



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**METODIKA PRO BEZKONTAKTNÍ DIAGNOSTIKU  
AUTOMOBILOVÝCH TLUMIČŮ**

METHODOLOGY FOR REMOTE DIAGNOSTICS OF THE AUTOMOTIVE SHOCK ABSORBERS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jakub Halama**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Jakub Halama**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Metodika pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Snižování hluku osobních vozidel je dlouhodobým problémem, se kterým se konstruktéři v automobilovém průmyslu potýkají. Mezi komponenty, které se mohou projevit zvýšeným hlukem při provozu, lze zařadit také součásti odpružení vozidla. Pokud k nežádoucím hlukovým projevům tlumičů dochází, je velmi obtížné stanovit příčiny hluku běžnými diagnostickými metodami. Bylo by proto vhodné navrhnout diagnostickou metodu, která by byla schopna chování tlumiče za provozu popsat s ohledem na vyzařovaný hluk. Pro řešení se předpokládá využití metod pro lokalizaci zdrojů hluku.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

### Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je návrh diagnostické metody na základě analýzy měřených akustických veličin pro posouzení funkčnosti tlumiče.

Dílní cíle diplomové práce:

- výběr vhodné metody pro lokalizaci zdrojů hluku na tlumiči,
- formulace metodiky měření, stanovení podmínek pro měření,
- experimentální ověření navržené metodiky a vyhodnocení výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

BENAZIZ, M., NACIVET, S. a THOUVEREZ, F. A shock absorber model for structure-borne noise analyses. Journal of Sound and Vibration. 2015, sv. 349, s. 177–194. ISSN 10958568.

ALONSO, M. a COMAS, Á. Thermal model of a twin-tube cavitating shock absorber. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 2008, sv. 222, č. 11, s. 1955–1964. ISSN 0954-4070.

ROSSING, T. D. Springer handbook of acoustics. New York: N.Y.: Springer, 2007. ISBN 978-0-3-7-30446-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



---

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá aplikací akustických metod za účelem hodnocení technického stavu tlumičů. Analýza akustických projevů při provozu tlumiče vede k definování nové bezkontaktní diagnostické metodiky, která je schopna identifikovat stav tlumičů.

První část práce se věnuje hlukovým projevům tlumiče, které jsou zapříčiněny neplynulým tlumením. Dále jsou popsány metody pro lokalizaci zdrojů hluku dostupné na Ústavu konstruování – je vysvětlen princip jejich činnosti, výhody a omezení. Na základě těchto informací je vybrána vhodná metoda, která je dále využita v experimentální části. Následně je na několika typech tlumičů vyvoláno zavzdušnění a stav úplného odběru oleje společně s poškozením pláště tlumiče. Hlukové projevy jsou měřeny mikrofonním polem a zvukoměrem, z naměřených dat jsou vypočteny akustické mapy, frekvenční spektra a grafy synchronní filtrace. Z rozdílů mezi akustickými projevy jednotlivých stavů je pro daný tlumič definováno vhodné diagnostické kritérium. V závěrečné části jsou diskutovány získané výsledky, na jejichž základě je formulovaná obecná diagnostická metodika, aplikovatelná na jakýkoliv typ konstrukce tlumiče.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Automobilový tlumič, lokalizace zdrojů hluku, akustická diagnostika, zavzdušnění, kavitace

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the application of acoustic methods for evaluating the technical condition of the shock absorbers. Analysis of acoustic radiation during damping operation leads to the definition of a new non-contact diagnostic methodology that can determine the condition of the shock absorbers.

The first part of the thesis focuses on the noise radiation of the shock absorbers, which is caused by discontinuous dumping. Further, the methods for the noise source localization available at The Institute of Machine and Industrial Design are described – with their functionalities, advantages and limitations. Based on all the information, an appropriate method is selected and used in the experimental part of this work. Then, aeration and removing the full volume of oil with damage of the shock absorber tube are caused (induced) on several types of the shocks. Noise radiation is measured by a microphone array and by a sound meter; the acoustic maps, frequency spectra and the synchronous filtration graphs are calculated from the measured data. From the differences in the acoustic radiations of each shock condition, a suitable diagnostic criterion for a specific shock absorber is defined. The final part discusses obtained results. Based on these results, a general diagnostic methodology, applicable to any type of shock absorber, is formulated.

## KEYWORDS

Automotive Shock Absorber, Noise Source Identification, Acoustic Diagnostics, Aeration, Cavitation

---



---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

---

HALAMA, J. *Metodika pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 90 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.



---

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

---

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Milana Klapky, Ph.D., a uvedl v seznamu všechny použité zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

-----  
Jakub Halama

## PODĚKOVÁNÍ

---

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D. za ochotu, vstřícnost a cenné rady při konzultacích a také mé rodině a přítelkyni za trpělivost během celého uplynulého studia.

---



**OBSAH**

---

<b>1 ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1 Tlumiče	15
2.1.1. Rozdělení hlukových projevů	15
2.1.2 Neplynulé tlumení	16
2.1.3 Kavitace v tlumicí kapalině	20
2.2 Akustická holografie	23
2.2.1 Omezení	24
2.2.2 NAH (Near-Field Acoustic Holography)	26
2.2.3 SONAH (Statistically Optimized NAH)	28
2.3 Beamforming	29
2.3.1 Princip metody	30
2.3.2 Omezení	33
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>37</b>
3.1 Analýza problému	37
3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	37
3.3 Podstata a cíle diplomové práce	38
<b>4 MATERIÁL A METODY</b>	<b>39</b>
4.1 Použité zařízení	39
4.1.1 Mikrofonní pole a systém PULSE	39
4.1.2 Zvukoměr	40
4.1.3 Tlumič Ford	41
4.1.4 Tlumič STOS	41
4.1.5 Tlumič Fiat	42
4.1.6 Hydraulický aktuátor Inova a rámová konstrukce	43
4.1.7 DEWETRON a DEWESoft	44
4.2 Měřicí řetězce	44
4.2.1 Měření pomocí mikrofonního pole	44
4.2.2 Měření pomocí zvukoměru	45
4.3 Parametry experimentů	46
4.4 Vyvolané vady na tlumičích	46
4.5 Metody vyhodnocování	47
4.5.1 FFT (Fast Fourier transform)	47
4.5.2 FIR filtr (finite impulse response)	48
4.5.3 Synchronní filtrace	49
<b>5 VÝSLEDKY</b>	<b>50</b>
5.1 Tlumič Ford, odpuštění oleje	50
5.1.1 Lokalizace zdrojů hluku	50
5.1.2 FFT a synchronní filtrace	53
5.2 Tlumič STOS, zavzdušnění	57
5.2.1 Lokalizace zdrojů hluku	58
5.2.2 FFT a synchronní filtrace	60
5.3 Tlumič Fiat, zavzdušnění	67
5.3.1 FFT a synchronní filtrace	68
<b>6 DISKUZE</b>	<b>73</b>
6.1 Analýza experimentů	73

6.2 Porovnání výsledků s poznatky z rešerše	77
6.3 Metodika pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů	78
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>80</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>81</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>84</b>
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>85</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK</b>	<b>89</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>90</b>



## 1 ÚVOD

1

Měření akustických veličin bývá v praxi velmi často prováděno z důvodu kontroly hygienických limitů hluku. Překročení doporučených hodnot zvuku u strojů a zařízení může člověku vyvolat poškození fyzického i duševního zdraví. Avšak hluk je také velmi často projevem špatné funkce strojů a zařízení. Jednou z cest technické diagnostiky může být právě aplikace metod na bázi měření akustických projevů, a to především v případech, kdy podmínky vyžadují bezkontaktní způsob měření. Neinvazivním způsobem tak lze naměřit a následně analyzovat akustické projevy za účelem hodnocení technického stavu.

Během provozu strojů a zařízení se každá komponenta projevuje svých charakteristickým hlukem. Mezi tyto komponenty lze také zařadit tlumičí soustavu vozidel či jiných dopravních zařízení. Při posuzování stavu tlumiče se špatný a nefunkční tlumič může projevit hlukem, který bude mít rozdílný charakter a průběh oproti jeho běžným akustickým projevům.

Automobilový tlumič (obr. 1) je důležitou komponentou vozidla zajišťující udržení kontaktu kola s vozovkou, čímž se zlepšuje ovladatelnost vozidla, dále jeho funkčnost ovlivňuje brzdnu dráhu a také komfort pasažérů. Vlakový tlumič vrtění zase zajišťuje, aby nedošlo k rozkmitání podvozku soupravy. Z těchto důvodů je nutné dokázat tlumiče efektivně diagnostikovat.

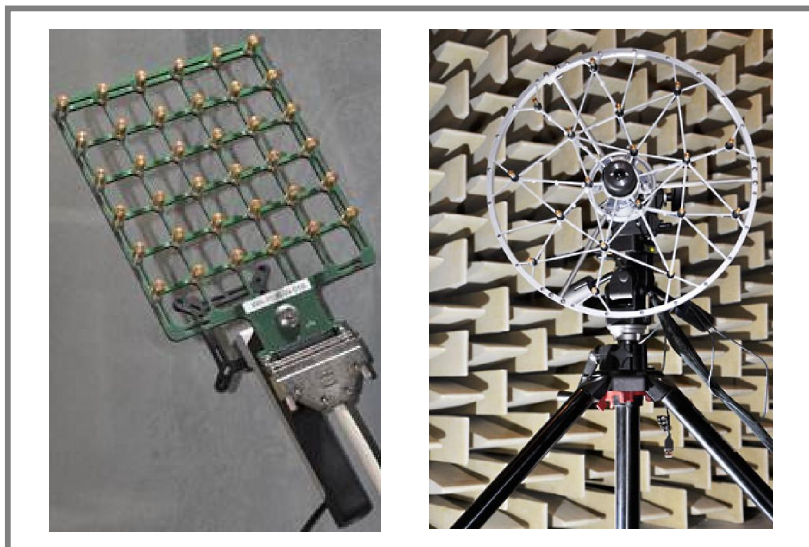


Obr. 1 Řez jednoplášťovým tlumičem [1].

Měření nežádoucích hlukových projevů a procesů vznikajících v tlumiči za provozu je velmi obtížné. V případě špatné funkce lze identifikovat vady pomocí kompletního rozmontování tlumiče. Tím se ale do tlumiče zasáhne, čímž se pozmění jeho předcházející stav. Proto je podstatné se těmto zásahům vyhnout a zkoumat takového uzavřené zařízení bezkontaktními metodami.

Aplikací akustických metod by se mohlo výše popsaným omezením vyhnout. Do tlumiče se nemusí nijak zasahovat, jelikož analýza hluku probíhá bezkontaktně. Během měření také nemusí být třeba zajistit laboratorní podmínky. Využití

bezkontaktních metod pro lokalizaci zdrojů hluku by mohlo přinést požadovanou, v praxi uplatnitelnou metodu, která by umožnila efektivní diagnostiku tlumiče, což by mohlo pomoci především při procesu vývoje nových tlumičů. V práci budou využity akustické metody dostupné na Ústavu konstruování (ÚK) (obr. 2).



**Obr. 2** Ruční a stacionární mikrofonní pole dostupné na ÚK, FSI VUT v Brně [2].

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

---

**2**

Rešeršní část je rozdělena na dvě části. První část popisuje hlukové projevy tlumičů se zaměřením na neplynulé tlumení a kavitaci, druhá část pak charakterizuje metody pro lokalizaci zdrojů hluku, dostupné na ÚK.

### 2.1 Tlumiče

---

2.1

Tlumiče pérování jsou nedílnou součástí podvozku všech dopravních prostředků. Jsou umístěny mezi nápravou a karoserií. Jedná se o technické zařízení, které tlumí výkmity mezi kolem a nápravou vozidla. Díky tomu nedochází k rozkmitání celého zařízení. Hlavním úkolem tlumiče je udržovat stálý kontakt kola s vozovkou. Vozidlo je pak lépe ovladatelné, stabilní v zatáčkách a jeho brzdná dráha je výrazně kratší. Bez tlumiče by byla jízda nebezpečná, výrazně by se zmenšil komfort jízdy a díky rázům do podvozku by se snížila životnost celého zařízení.

Z fyzikálního hlediska tlumič disipuje přijímanou energii [3]. To znamená, že dochází k nevratné přeměně části kinetické energie v jinou energii, v tomto případě na teplo. Tato přeměna je realizována nejčastěji formou smykového nebo viskózního tření.

#### Opotřebení a nesprávná funkce tlumičů

Se zvyšujícím se opotřebením tlumičů se zhoršují jízdní vlastnosti vozidla. Špatně fungující tlumič se snadno pohybuje z jedné krajní polohy do druhé a nedochází k tlumení rázů. Tlumičí síla tedy není dostatečně velká, aby byl zajištěn přítlak kola na vozovku. Projevem nesprávné funkce tlumiče může být kolébání vozu, chvění volantů, odsakování kol nebo tvrdé rázy při najetí na nerovnost.

#### Poškození tlumiče spojené s hlukem

Hlukem se projevují opotřebené nebo tekoucí tlumiče [3, 4]. Hluk, respektive syčivý zvuk se může u vozidla objevit v případě uvolněného ochranného krytu tlumiče nebo chybějícího krycího víčka nad tlumičem. Uvnitř tlumiče může zvýšený hluk způsobovat poškození pojistného kroužku, který je v drážce na pístnici, nebo poškození těsnění v tlumiči či nerovnosti na závitě stopky pístnice.

#### 2.1.1. Rozdělení hlukových projevů

---

2.1.1

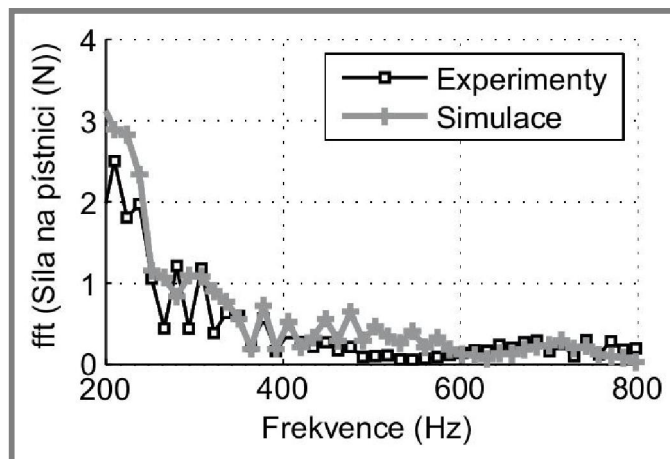
Existuje rozdíl mezi hlukem šířícím se konstrukcí tlumiče a hlukem šířícím se vzduchem [5]. Hluk šířící se vzduchem je nejčastěji slyšet při buzení tlumiče na zkušebním zařízení. Takovýto hluk může vozidlo pohltit nebo naopak může být zvuk vozidlem zesílen. V případě hluku šířícím se konstrukcí tlumiče není zvuk přenášen vzduchem, ale mechanicky kmitáním. Specifická konstrukce tlumiče a jeho uchycení pak určí celkovou hodnotu hluku.

Při analýze charakteristik tlumičů odpovídá nižšímu rozsahu frekvencí hydraulické chování tlumiče a vyššímu rozsahu frekvencí hluk a vibrace [6].

Hydraulické chování se projevuje ve frekvencích do 30 Hz.

Za hluk a vibrace mohou tzv. vysokofrekvenční síly (vysokofrekvenční vibrace). Jedná se o mechanické vibrace šířící se konstrukcí tlumiče vedoucí právě k tvorbě zvuku. Dle [7] se tyto nežádoucí zvukové projevy nejčastěji vyskytují

ve frekvenčním rozsahu 200 až 1 000 Hz (obr. 3). Podle [5] je zvuk tvořený vysokofrekvenčními silami v rozsahu 100 až 900 Hz. Články [6, 8] pouze konstatují,



Obr. 3 Frekvenční spektrum mezi 200 až 800 Hz síly působící na pístnici. Velké množství hodnot spadá především do frekvencí pod 400 Hz [7].

že se jedná o frekvence až do hodnot 1 000 Hz.

Pro studium zdrojů hluku v tlumičích lze využít i softwarové modely [9]. Modely uvažující stlačitelnost kapaliny, dynamiku pružinových ventilů a nelineární vztahy mezi průtokem a tlakem jsou schopny dobře predikovat nelineární chování tlumičů. Data ze simulací mohou odpovídat výsledkům experimentálních zkoušek, avšak simulace bývají vyladěny právě na určitý typ tlumiče a určitý typ experimentu, tudíž se nejedná o univerzální a širěji aplikovanou metodu.

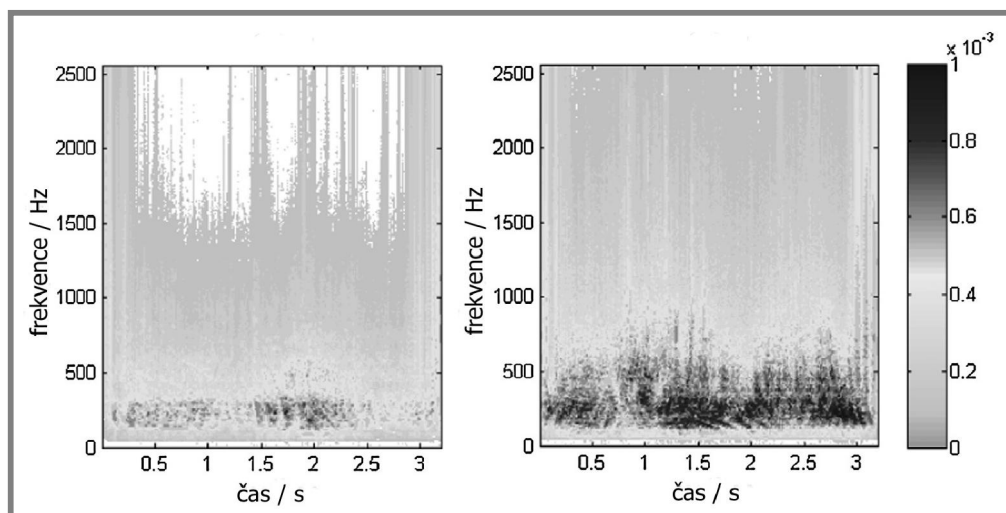
### 2.1.2 Neplynulé tlumení

Neplynulé tlumení způsobuje hned několik faktorů: nelineární F-v charakteristika, kavitace kapaliny v tlumiči, třecí síly a také otevírání a zavírání ventilů na pístu [7]. Nežádoucí hluk může vznikat díky statickému tření ventilu a dynamice ventilové pružiny.

Za šíření hluku v tlumičích mohou nelineární jevy projevující se nespojitostmi v odezvě tlumiče. Pokud automobil najede na nerovnou cestu, přes tlumič se začnou do karoserie vozu přenášet nežádoucí otřesy a rázy ústící ve vibrace. Cestující v interiéru pak mohou slyšet rachotivý zvuk („rattling noise“).

Obr. 4 porovnává zvukové spektrum normálního tlumiče a zvukové spektrum tlumiče s rachotivým zvukem [10]. O jaký typ měřeného tlumiče šlo autoři neuvádí. Z hlukových intenzit je zřejmé, že tento typ hluku spadá do frekvencí pod 1 000 Hz. Dále lze konstatovat, že se snižující hodnotou frekvence narůstá intenzita hluku. Rozdíl mezi intenzitou hluku normálně pracujícího tlumiče a tlumiče s rachotivým zvukem je výrazný.

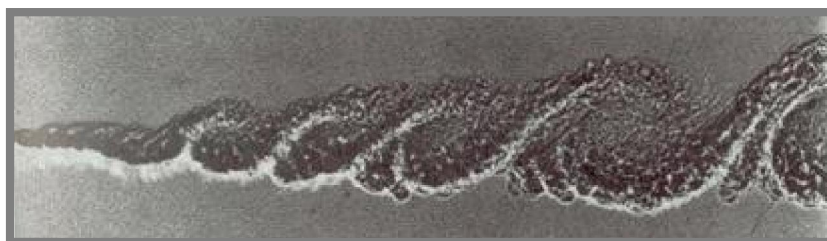
Zdroj [9] také uvádí, že za hluk šířící se konstrukcí mohou vibrace vyvolané tlumičem. Tyto vibrace jsou vyvolány třením, kavitací kapaliny, otevíráním a uzavíráním ventilů na pístu tlumiče nebo dalšími komplexními jevy. Bylo zjištěno, že příčiny nelineárního chování tlumiče jsou lokalizovány v blízkosti pístu.



**Obr. 4** Levá část představuje zvukové spektrum normálně pracujícího tlumiče, pravá část pak tlumič projevující se rachotivým zvukem [10].

Nejzávažnějším projevem hluku tlumičů je zvuk připomínající klepání („knocking noise“) [11]. Jedná se o hluk šířící se konstrukcí, který je vyvolán vibrací pístnice. Tyto vibrace se dále přenášejí do podvozku. Jsou vyvolány především otevíráním a uzavíráním ventilů a třením při změně zdvihu.

Hluk přenášející se konstrukcí může být způsoben hydraulickými přechody přes píst [5]. Tyto změny jsou charakteristické pro každý ventil zvlášť. Otevírání a zavírání klapky pro průtok oleje je velmi často spojeno s projevem vtokové nestability kapaliny (viz obr. 5). Vznikají malé odchylky pohybu kapaliny, a ty vedou k tvorbě vysokofrekvenčních sil, které vytvářejí hluk připomínající chichotání („chuckle noise“).



**Obr. 5** Vtoková nestabilita, v tomto případě se jedná o projev nestability proudění vykreslený na písčitém dně [12].

Díky nelineárnímu chování tlumiče mohou být generovány tzv. vysokofrekvenční síly, které jsou vyvolané pouze nízkofrekvenčním pohybem [5, 6].

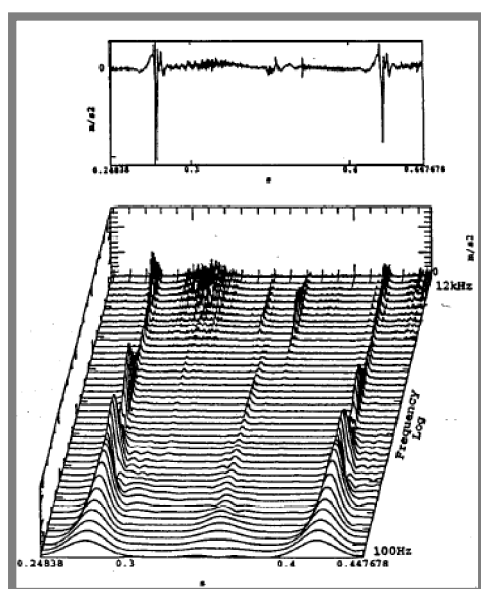
Existuje korelace mezi „rachotivým zvukem“ v tlumičích a rezonancí kol automobilu [5, 7]. Za hluk může první vlastní frekvence kol, která nastává mezi 10 až 15 Hz. Byla zjištěna časová závislost mezi akustickým tlakem měřeným v interiéru vozu a zrychlením a silami působícími mezi pístnicí tlumiče a karoserií.

Vysokofrekvenční síly na pístnici mají pouze přechodný charakter. Proto je pro studium třeba časová analýza, aby se dalo určit, který druh hydraulických

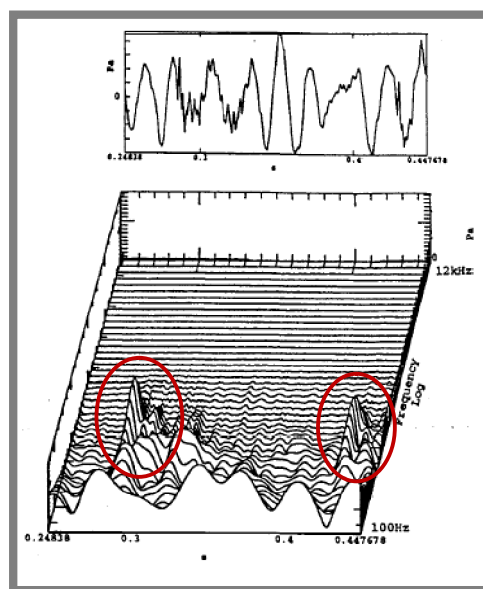


přechodů způsobuje hluk. Pro vyhodnocení je vhodné využít časově frekvenční analýzu obsahující ucelenější pohled na vznikající procesy.

Horní část obr. 6a zobrazuje časový průběh zrychlení pístnice tlumiče. Autoři [5] nespecifikují použitý typ tlumiče. Efektivní hodnota zrychlení byla změřena na horní části pístnice, když byl tlumič excitovaný sinusovým signálem. Je zobrazen průběh jedné a půl periody excitace. Ve spodní části je signál převeden na časově frekvenční doménu. Obr. 6b zobrazuje časový průběh akustického tlaku měřeného v kabině vozu při totožné excitaci tlumiče. Z obou obrázků je patrná spojitost mezi zrychlením a změřenými akustickými projevy. Akustický tlak způsobený neplynulostí zrychlení je na obrázku zvyrazněn.



**Obr. 6a** Časový průběh zrychlení a jeho frekvenční rozklad [5].

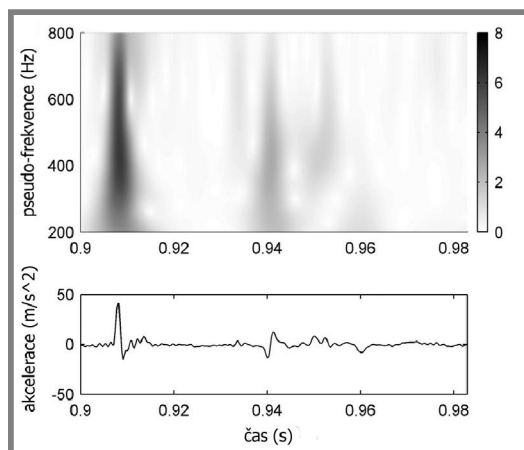


**Obr. 6b** Časový průběh akustického tlaku v interiéru vozidla a jeho frekvenční rozklad [5].

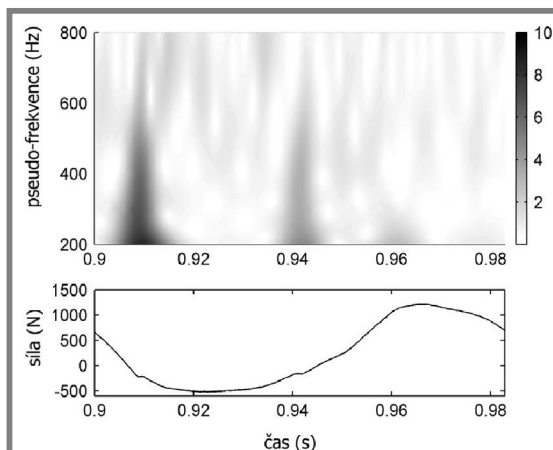
Na následujících obrázcích 7a a 7b je zobrazeno experimentálně změřené zrychlení na pístnici tlumiče a tlumicí síla. Zrychlení se dá chápat jako vibrace přenášené pístnicí, které jsou získány efektivní hodnotou na snímači. Společně s časovým průběhem síly a zrychlení je zde také zobrazena časově frekvenční doména. Pro experiment byl použit dvouplášťový tlumič.

Vyšší úroveň zrychlení (ráz) v časově frekvenční doméně nastává, když dojde k otevření prvního pružinového ventilu. To samé se dá konstatovat v případě měřené síly. Frekvence akcelerace je v tomto okamžiku rozprostřena na širokém rozsahu frekvencí. Je pravděpodobné, že hluk bude vybuzen v tomto frekvenčním pásmu.

Úplně se vyhnout hluku šířícím se konstrukcí je nemožné z důvodu toho, že hydraulické vysokofrekvenční síly tvořené v tlumiči nemohou být eliminovány, protože jsou součástí tlumicího principu. Je nutné hledat kompromis mezi vysokofrekvenčními silami a tlumícím účinkem, a to například vhodnými úpravami konstrukce tlumiče.



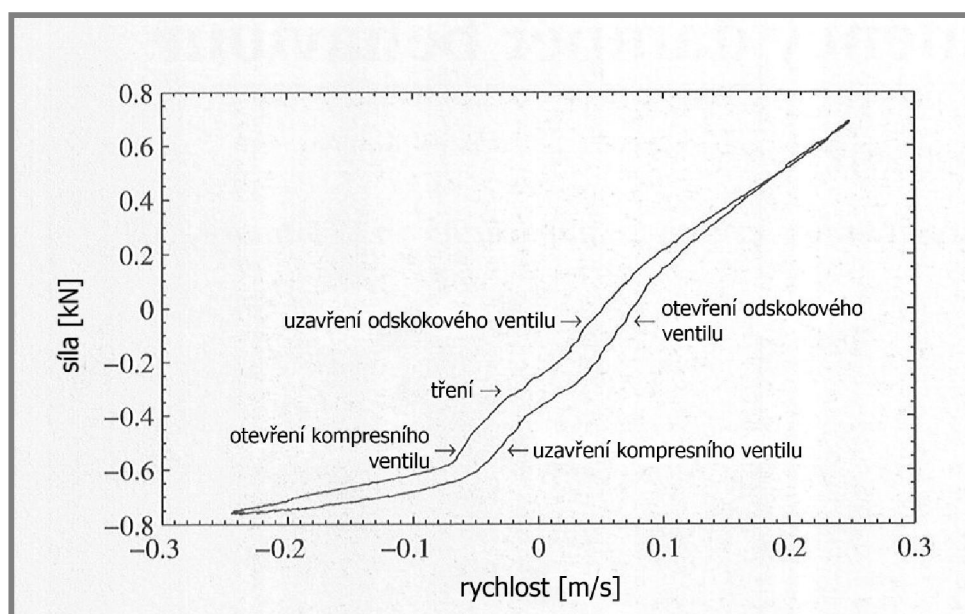
**Obr. 7a** Časově frekvenční doména (nahore) zrychlení změřeného na pístnici tlumiče. Dole je zobrazen časový průběh tohoto zrychlení [7].



**Obr. 7b** Časově frekvenční doména (nahore) tlumicí síly tlumiče. Dole je zobrazen časový průběh této síly [7].

Podle [8] vysokofrekvenční síly generuje tření mezi pláštěm a pístem a také průtok hydraulickým ventilem, obojí při rychlostech blížících se nule. Dalším mechanismem tvorby těchto sil je změna průtoku mezi drážkami pístu a ventily na planžetách.

Obr. 8 ilustruje průběh neplynulého tlumení u plynokapalinového jednoplášťového tlumiče. Záporná rychlost představuje kompresi (pohyb při nárazu) a kladná rychlost naopak rozšíření (pohyb při odskoku). Malá nespojitost při nulové rychlosti naznačuje přítomnost tření. Za záporné hodnoty tlumicí síly při nulové rychlosti může vnitřní tlak v tlumiči. Kvůli kompresi vnitřního plynu tlumiče je pozorována při této nízké frekvenci hysterezní křivka. Horní protnutí křivky a nulová rychlost nastává v okamžiku, kdy je tlumič nejvíce vysunut a tlak vnitřního plynu je nejnížší. Naopak při dolním protnutí křivky a nulové rychlosti je tlumič nejvíce zasunut a vnitřní tlak plynu je nejvyšší.

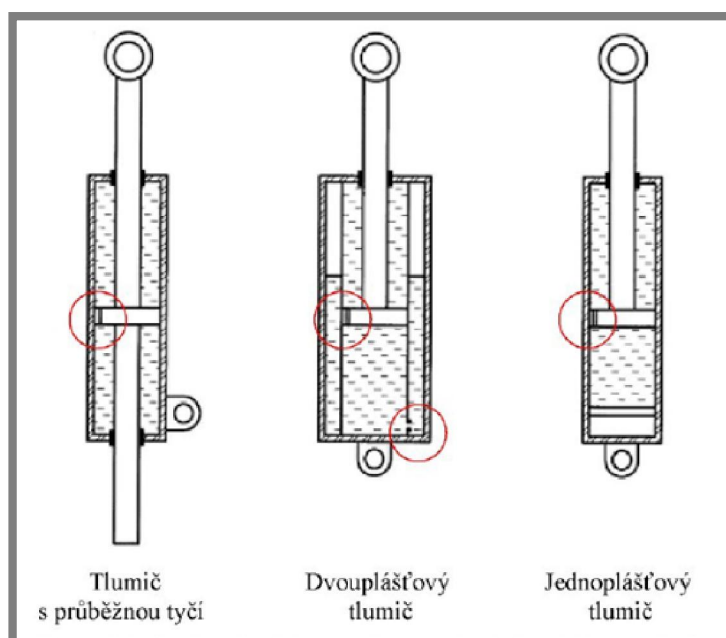


**Obr. 8** Tlumicí křivka pro excitaci tlumiče frekvencí 1 Hz, amplitudou 40 mm [8].

Menší sklon křivky poblíž hodnoty tlumicí síly  $-0,04$  kN odpovídá začátku průtoku kapaliny ventilem otevírajícím se při rozšíření, odskoku tlumiče. Při klesající rychlosti je ventil od tohoto bodu uzavřen. Menší sklon křivky je viditelný i při hodnotě  $-0,52$  kN tlumicí síly. Dle autorů článku [8] tento menší sklon odpovídá otevření či uzavření ventilu otevírajícím se při stlačení, kompresi tlumiče. Z křivky je vidět, že otevření ventilů způsobí větší změnu sklonu než jejich uzavření.

### 2.1.3 Kavítace v tlumicí kapalině

Na velikost tlumicí síly mají vliv parametry jako stlačitelnost kapaliny, deformace pracovního prostoru, míra tepelných projevů nebo právě kavítace kapaliny [13]. Kavítace se může tvořit v místech škrticích elementů, což ilustruje obr. 9 [3].



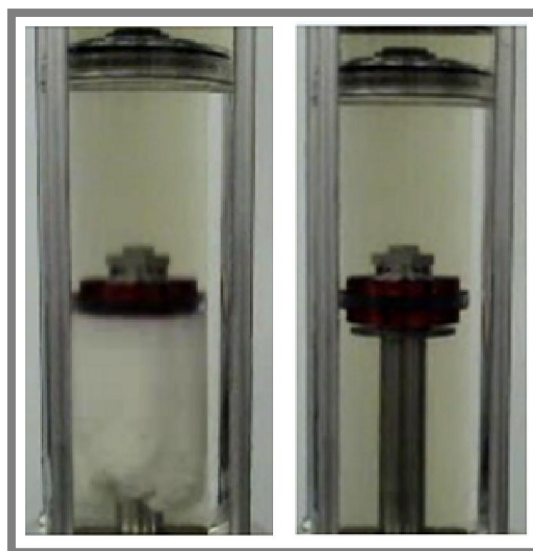
**Obr. 9** Schémata teleskopických tlumičů a znázornění škrticích elementů, tedy míst, kde může vznikat kavítace [3].

Při kavítaci vznikají v kapalině dutiny kvůli lokálním poklesům tlaku<sup>1</sup> (obr. 10) [13]. Následně vzniklé bubliny kolabují a jev je zakončen vznikem rázové vlny, která má destruktivní účinek na okolí. Důvodem vzniku kavítace může být lokální zvýšení rychlosti kapaliny. Kromě již zmíněného mechanického poškození okolních součástí je kavítace doprovázena zvýšenou intenzitou hluku.

Tlumič z podstaty principu disipuje okolní energii, generované teplo zvyšuje teplotu oleje a s tím roste riziko kavítace [3, 13]. Obr. 11 ukazuje nárůst teploty oleje u dvouplášťového tlumiče, teplota narůstá v řádech desítek stupňů již po několika minutách. Tlumicí síla pak výrazně klesá.

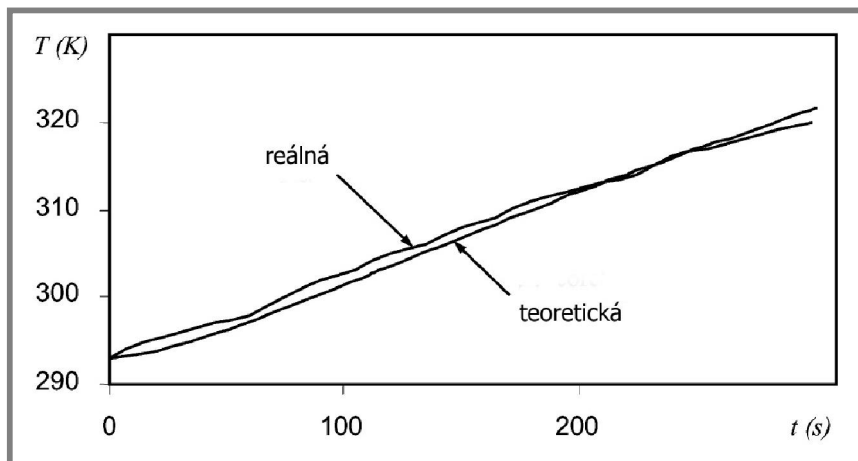
<sup>1</sup> Kavítace nastane, pokud lokální statický tlak v kapalině klesne pod tlak páry při konstantní teplotě. Tento děj probíhá velmi rychle, v řádu mikrosekund [15].





**Obr. 10** Tlumič s kavitací (vlevo) a bez kavitace (vpravo) [14].

Kavitace vzniká v tlumičích především při fázi komprese, a to na straně pístu s menším tlakem [3, 15]. Tlumič je vystavován soustavně změnám tlaku během střídání kompresní a odskokové fáze, v oleji se mohou začít tvořit bubliny a následně dochází ke snížení tlumicí síly. Kavítace dále mění průběh  $F$ - $v$  charakteristiky a vytváří větší hysterezi.

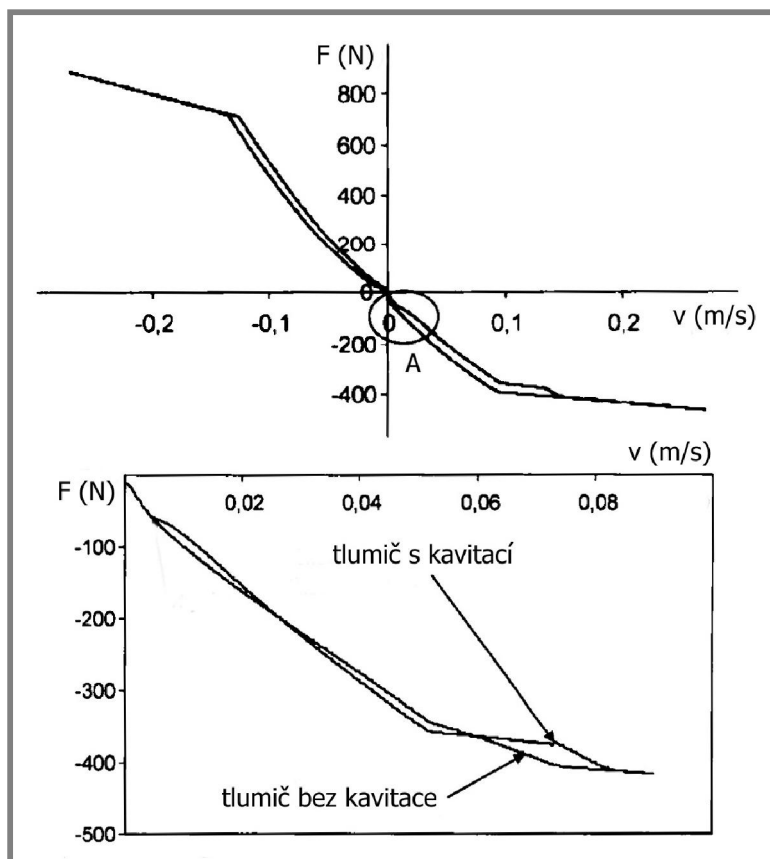


**Obr. 11** Závislost teploty tlumicí kapaliny a pracovního času tlumiče. Tlumič je buzen frekvencí 1,5 Hz s amplitudou 40 mm, sinusový signál [13].

Kolaps bublin je doprovázen zvukovým doprovodem, a to především kvůli následnému kontaktu rázové vlny s konstrukcí tlumiče [16]. Celkový hluk samotné kavítace kapaliny se skládá ze dvou částí – z hluku způsobeného turbulencí a z hluku od kavítace. V okamžiku vzniku kavítace je hluk nejvyšší, následně se hluk při vyšší tlakové ztrátě snižuje. Pokles hluku i přes vyšší tlakové ztráty může být způsoben např. poměrem plynů a kapaliny v bublině a tím se měnícími akustickými podmínkami prostředí či plyny, které tlumí vysoké amplitudy tlakových vln.

Velikost kavitačního hluku je přímo úměrná poměru mezi tlakem při počátku kavitace a následným (výstupním) tlakem. Čím větší je tlaková ztráta, tím větší je akustický projev tohoto jevu a také se v kapalině vytvoří více bublin. Dalším faktorem ovlivňujícím intenzitu hluku je poměr mezi výstupním tlakem kapaliny a tlakem plynů, tento poměr vypovídá o síle imploze, která způsobuje kolaps bublin.

Obr. 12 ilustruje rozdíl v tlumicí síle, pokud je či není v oleji dvouplášťového tlumiče kavitace [17]. Obě F-v křivky reprezentují tentýž tlumič a tytéž zatěžovací podmínky.



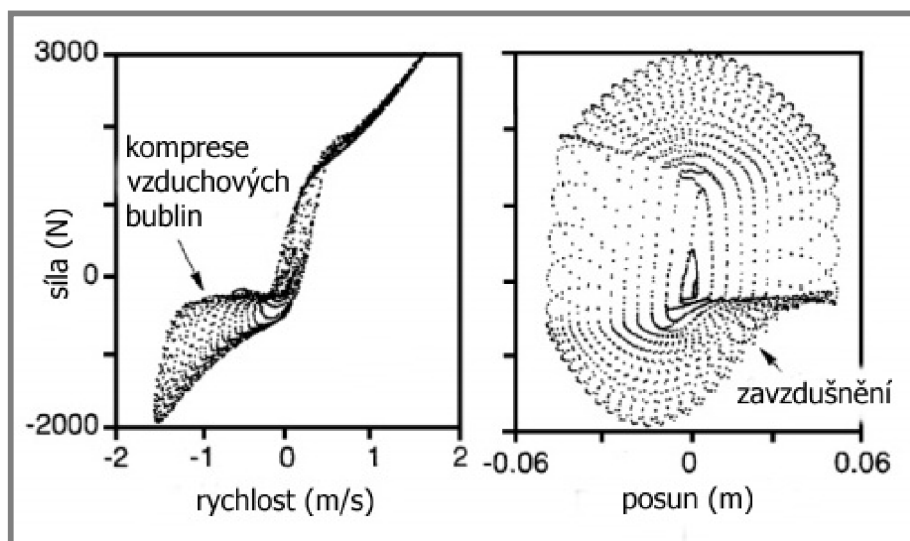
**Obr. 12** Průběh F-v charakteristiky tlumiče (nahore). Výřez A z této křivky je zobrazen ve spodní části obrázku. Horní křivka je pro tlumič s kavací, spodní pro ten bez kavací [17].

Tvorba kavitace je na obrázku znázorněna ve výřezu A, kdy jsou v části objemu, který je vytlačovaný pístem, vzduchové bublinky. Průtok oleje procházející ventily pístu se mění podle množství vytvořené kavitace<sup>2</sup>. Určité množství objemu, které by bez kavitace proteklo přes ventily, se dostane do vyrovnávacího prostoru. Díky tomu dojde k nárůstu kompresního tlaku.

Čím nižší je tlaková ztráta v kapalině mezi pracovními prostory pod a nad pístem, tím nižší je tlumicí síla. To znamená, že při vytvoření kavitace tlumicí síla pístu klesá.

<sup>2</sup> V první fázi kavitace dochází ke zvýšení stlačitelnosti kapaliny. Tato změna objemu způsobuje omezení průtoku ventilem [15].

Pokud v tlumiči díky kavitaci vznikly vzduchové bubliny, charakteristiky tlumení se mění [15]. Při fázi odskoku dochází k velkému posunutí pístu. Na začátku následující fáze komprese bublinky zkolabují, jelikož jejich odpor vůči kompresi je velmi malý. Po stlačení vzduchových bublin kapalina vykazuje již normální odpor. Tyto projevy jsou zobrazeny na obr. 13.

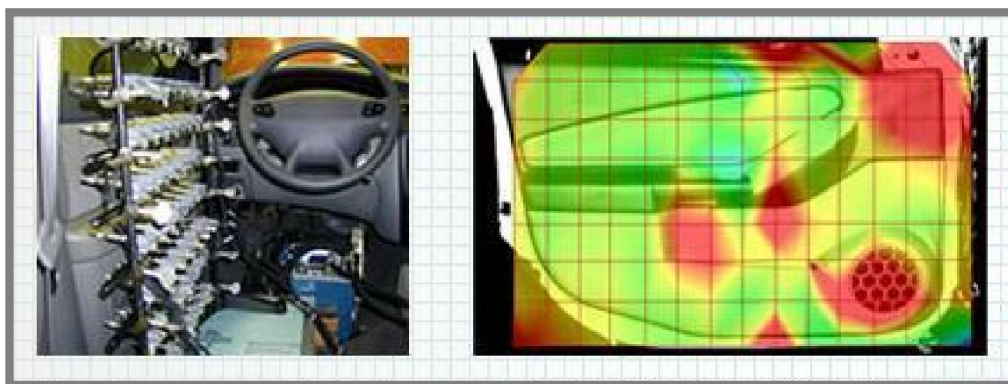


Obr. 13 F-v a F-x charakteristika při zavzdušnění a následném stlačování vzduchových bublinek [15].

## 2.2 Akustická holografie

Akustická holografie je bezkontaktní metoda pro lokalizaci zdrojů zvuku v koherentním zvukovém poli<sup>3</sup> a pro stanovení prostorového šíření akustických vln [19, 20]. Akustická holografie dokáže vizualizovat distribuci jednotlivých zvukových příspěvků na povrchu měřeného zařízení nebo v jiné rovnoběžné rovině blízké povrchu. Body o stejné intenzitě jsou propojeny stejně barevnými plochami, což vytvoří výslednou mapu vyzařovaného hluku. Vyznačuje se vysokou přesností

2.2



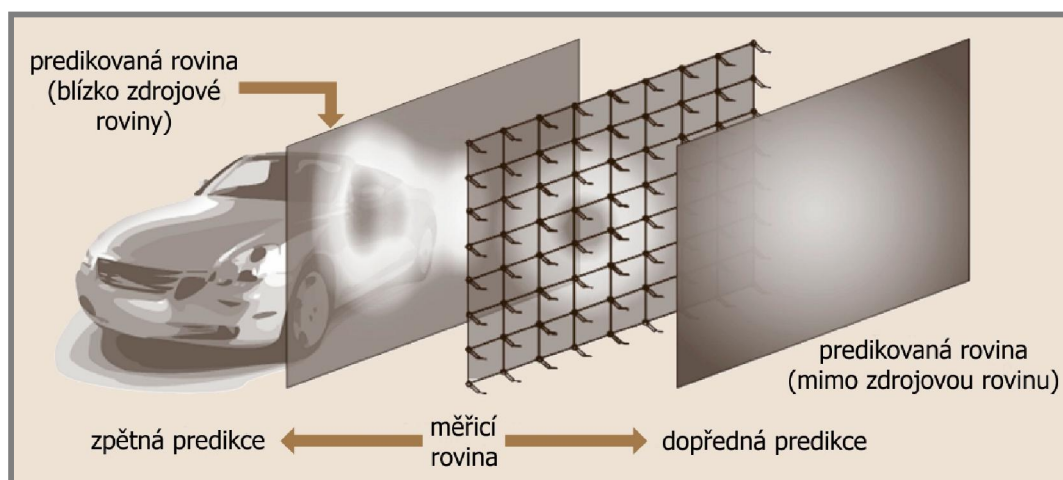
Obr. 14 Příklad měření zvuku za pomoci akustické holografie, která poskytuje přesnou zvukovou mapu o vysokém rozlišení představující rovinu povrchu zvukového zdroje [18].

<sup>3</sup> Koherentní zvukové pole obsahuje taková vlnění, která se šíří se stejnou úhlovou frekvencí. Koherentní zdroj zvuku může být považován za inkoherentní, pokud je vzdálenost od zdroje výrazně větší než vlnová délka [46].

lokalizace a také vysokým dosažitelným rozlišením.

Během akustické holografie se měří akustické parametry mimo zdroj zvuku, přičemž měření probíhá blízko u tohoto zdroje za pomoci pole snímačů, jak je patrné z obr. 14 [21]. Snímače měří buďto akustickou rychlost nebo akustický tlak současně v každém bodu mřížky měřicího pole. S využitím časových zpoždění amplitud zvukových vln, které jsou změřeny v jedné rovině, je dále vypočteno zvukové pole ve virtuálních rovinách rovnoběžných s měřicí rovinou. Následovně může být rekonstruováno celé tří prostorové zvukové pole.

Akustická holografie měří akustické rychlosti a akustické tlaky v blízkém poli zvukového zdroje (obr. 15) [19, 20, 22]. Z toho důvodu zachycuje mikrofonní pole šířící se vlny i evanescentní vlny<sup>4</sup>. Pro princip této metody je klíčové, aby naměřený zvukový signál obsahoval evanescentní vlny, čímž se ale zmenšuje možná měřicí vzdálenost od povrchu zdroje. Podstatou akustické holografie je z naměřeného akustického vlnění od sebe oddělit tyto dva typy vln. Výpočtový algoritmus dokáže odlišit vlnění na základě vlnového čísla. Pro analýzu hluku metoda AH potřebuje pouze šířící se vlny. Evanescentní vlny se prostorem od zdroje nešíří, a tudíž je musíme během hodnocení akustických projevů vypustit.



**Obr. 15** Ilustrace metody akustické holografie. Měřicí pole je umístěno v blízkém poli zdroje a dokáže zachytit i evanescentní vlny [19].

Výhodou akustické holografie je využitelnost metody na širší spektrum zvukových zdrojů. Pro měření blízko povrchu zdroje zvuku je právě tato metoda schopna vytvořit akustickou mapu rychle a přesně. Nevýhodou je nutnost využít specifické a rozměrné vybavení.

### 2.2.1 Omezení

Akustická holografie pracuje především s nízkými a středními frekvencemi, a to od 100 Hz do 2 kHz [23]. Dle [19] přibližně od 50 do 3 000 Hz.

Vzdálenost jednotlivých mikrofonů na měřícím poli ovlivňuje limit měřitelné frekvence [24, 25]. Maximální měřitelná frekvence je omezena, protože vysoké

<sup>4</sup> Evanescentní vlny existují pouze v blízkém akustickém poli, jejich amplituda se vzdáleností od zdroje exponenciálně klesá [19].

frekvence by vyžadovaly obrovské množství mikrofonů velmi blízko u sebe (obr. 16 a obr. 17).

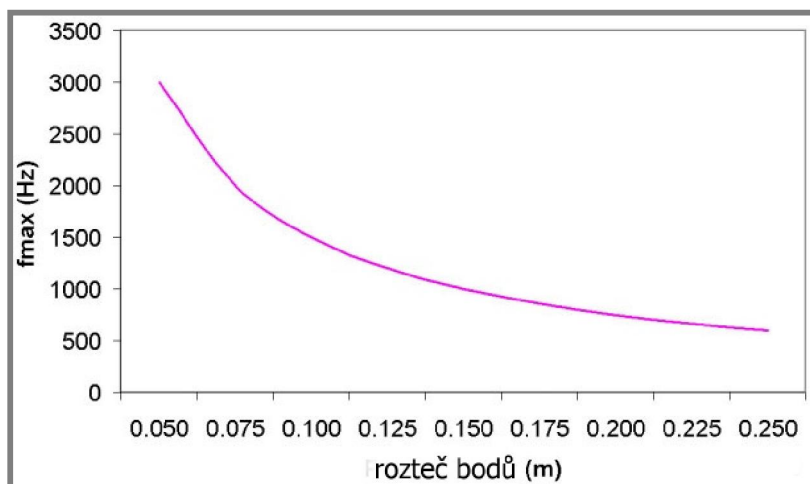
horní frek. kHz	vzdál. mik. cm	$\approx 15$
1.0 kHz	15 cm	
1.5 kHz	10 cm	
2.0 kHz	7.5 cm	
3.0 kHz	5 cm	
5.0 kHz	3 cm	

Obr. 16 Závislost horní limitní frekvence a rozestupu mikrofonů [19].

Tyto závislosti jsou definovány vztahem:

$$f_{max} \leq \frac{c_0}{2 * \Delta} \quad (1)$$

kde  $f_{max}$  je maximální měřitelná frekvence v Hz,  $c_0$  je rychlost zvuku v m/s a  $\Delta$  je vzdálenost mikrofonů v m [19, 20].

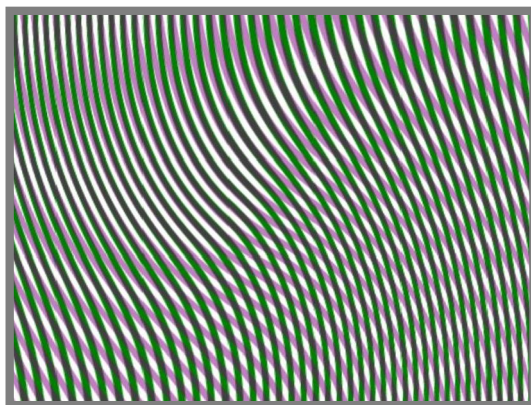


Obr. 17 Závislost rozteče měřicích bodů na maximální měřitelné frekvenci [26].

Dá se také říci, že vzdálenost mezi jednotlivými mikrofony na měřicím poli by měla být menší než polovina vlnové délky nejvyšší frekvence měřeného zvuku. V opačném případě se totiž mohou projevit problémy projevující se prostorovým aliasingem [24, 25, 27]. Tento aliasing se vyskytuje v prostorovém vzorkovacím signálu vznikajícím chybnou predikcí šíření vln, na obrazech vznikají nežádoucí moaré vzory. Příklad takové chyby je vidět na obr. 18.

Dosažitelné prostorové rozlišení je limitováno vlnovou délkou [21]. Pokud jsou dva zvukové zdroje k sobě blíže, než je velikost vlnové délky, nemohou pak být od sebe tyto zdroje odlišeny.





Obr. 18 Moaré vzor, příklad aliasingu [28].

Rozlišení akustické holografie je také limitováno rozestupy mikrofonů, což platí, pokud je vzdálenost od zdroje menší nebo rovna rozteči mřížky mikrofonního pole [25, 27, 29]. V takovém případě je rozlišení rovno rozteči mikrofonů. U nízkých frekvencí není rozlišení nikdy horší než velikost vzdálenosti pole od měřeného zdroje.

Pokud měříme velmi blízko u zdroje a vzdálenosti mikrofonů jsou malé, akustická holografie dokáže zachytit evanescentní vlny. Proto má holografie při nižších frekvencích vysoké prostorové rozlišení. Při vyšších frekvencích je rozlišení akustické holografie mírně lepší než u beamformingu (viz kap. 2.3), dosahuje přibližně hodnot poloviny vlnové délky.

Studie ukazují, že ideální vzdálenost od měřeného povrchu je o velikosti jeden a půl násobku rozestupu mikrofonů [22].

Existují různé techniky, které dokáží obejít výše popsaná omezení. Maximální měřenou frekvenci lze navýšit například fokalizací<sup>5</sup> [29, 30]. Tou jde dosáhnout dvojnásobné měřitelné frekvence, aniž by se musely měnit vzdálenosti mezi mikrofony. Fokalizace také přináší vyšší prostorové rozlišení při lokalizaci zdroje zvuku v nízkých frekvencích. V praxi se fokalizace využívá pro měření nadměrně velkých zařízení, u kterých tak odpadáva nutnost použití příliš hustého mikrofonního pole i při vyšších frekvencích.

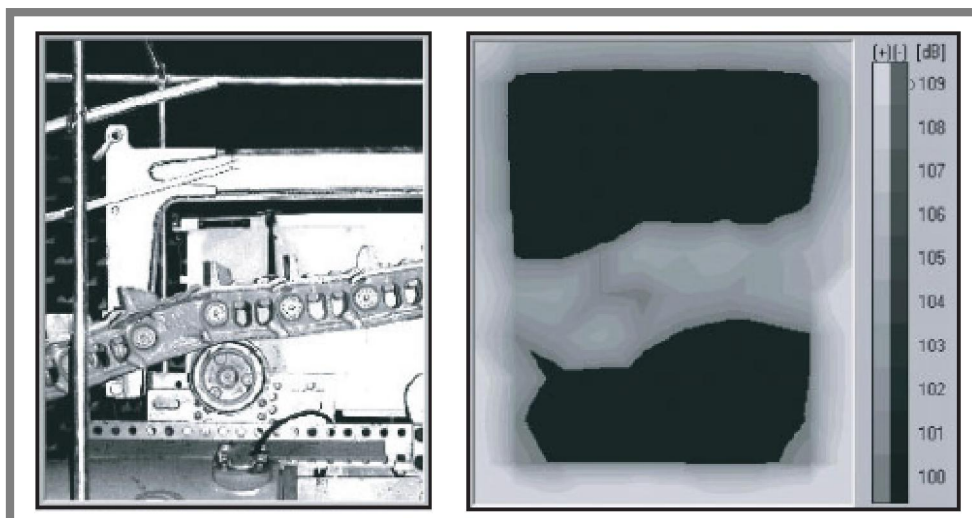
### 2.2.2 NAH (Near-Field Acoustic Holography)

NAH je zavedená metoda akustické holografie pro lokalizaci zdrojů zvuku [19–21, 31]. Její princip je založen na 2D prostorové diskrétní Fourierově transformaci. Pro výpočet tří prostorového zvukového pole se využívá Greenova funkce a vlnové rovnice.

Měření akustických projevů je provedeno mikrofonním polem umístěným v blízkém poli zvukového zdroje. Z podstaty FFT je potřeba rovinná pravoúhlá mřížka s pravidelným rozložením mikrofonů. Dále musí být splněna podmínka velikosti mikrofonního pole. To při metodě NAH musí zcela pokrýt celý měřený zdroj a k tomu ještě navíc přibližně 45° prostorového úhlu, aby se zabránilo tzv. edge

<sup>5</sup> Zařízení dostupná na ÚK těmito technikami nedisponují.

efektům (také „windowing effect“) [24–26]. Tyto nepříznivé jevy jsou patrné na obr. 19.



**Obr. 19** Ukázka edge efektu vzniklého při měření metodou NAH. Zvuková mapa kopíruje okraje vypočteného obrazce, jelikož je zvukový zdroj větší než mikrofonní pole [25].

Nevýhodou metody NAH je limitace při měření a výpočtu povrchů kvůli různým souřadnicovým systémům (např. cylindrický, sférický, rovinný atd.) [22, 27]. Jinými slovy NAH musí předpokládat měřený zvukový zdroj jako konkrétní základní geometrický útvar.

V případě metody NAH se může pomocí změřeného 2D pole akustických tlaků vypočítat nejen tří prostorové zvukové pole, ale také pole vektorů akustické intenzity nebo akustických rychlostí [21, 29]. Pomocí holografie je možné měřit rychlosti částic a posuvy, z čehož plyne, že je možné analyzovat i vibrace měřeného zdroje<sup>6</sup>.

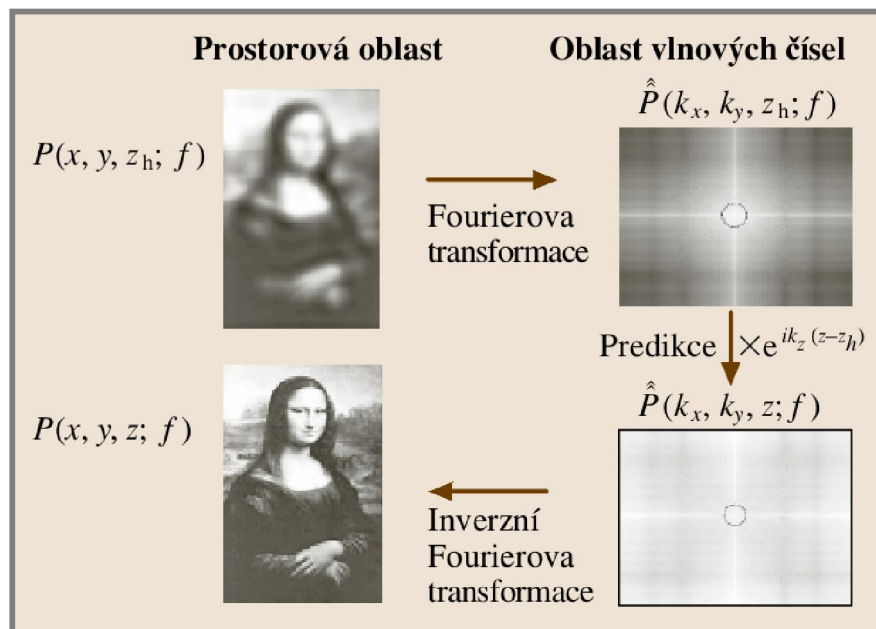
#### Princip metody

Na obr. 20 je zobrazen průběh procesů při analýze hluku metodou NAH [19, 27]. Nejprve jsou změřeny akustické tlaky v rovině mikrofonního pole (v tomto případě obraz Mony Lisy, který je neostrý, jelikož je pořízen v jiné rovině, než je rovina plátna). Výpočtový algoritmus řeší rovnici akustické vlny a následuje provedení FFT analýzy, která převede zvukové pole z prostorové oblasti do oblasti vlnových čísel.

S jejich využitím výpočetní algoritmus a Greenova funkce predikuje šíření vln v prostoru, zvukové pole může být převedeno do jiné roviny rovnoběžné s tou měřicí. Posledním krokem je provedení inverzní FFT, která vlnová čísla převede zpět do prostorové oblasti. Tím v požadované rovině získáme predikované rozložení akustických tlaků (nebo „ostrý“ obraz Mony Lisy, protože se pomocí přepočtu FFT dostaneme přímo do roviny plátna).

Tyto operace nejsou náročné na výpočetní výkon, proto mohou mít měřicí pole velké množství senzorů

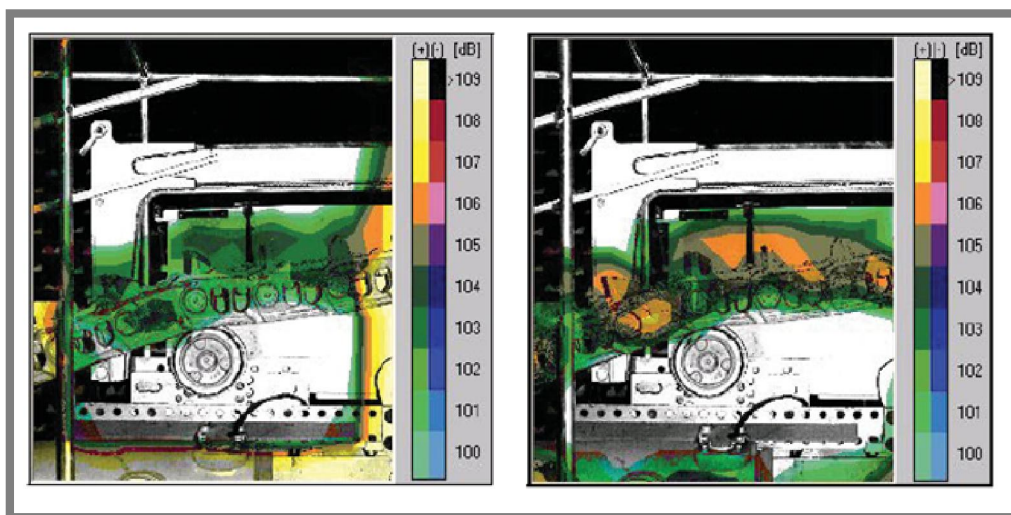
<sup>6</sup> Holografie díky tomu může nahradit jiné metody, jako je laserové skenování nebo měření akcelerometry [27].



Obr. 20 Průběh procesů během metody NAH [19].

### 2.2.3 SONAH (Statistically Optimized NAH)

Jedná se o metodu vycházející z NAH [24, 25]. Metoda SONAH vychází z předpokladu, že charakter měřeného vlnění lze popsat pomocí elementárních vln, a tedy analyzovat parametry vlnění na jednotlivých mikrofonech. Na rozdíl od NAH může fungovat s nepravidelným rozložením senzorů na měřicím poli<sup>7</sup>. Pořád je ale nezbytné dodržet podmínku průměrné vzdálenosti mikrofونů, ta musí být oproti vlnové délce poloviční.

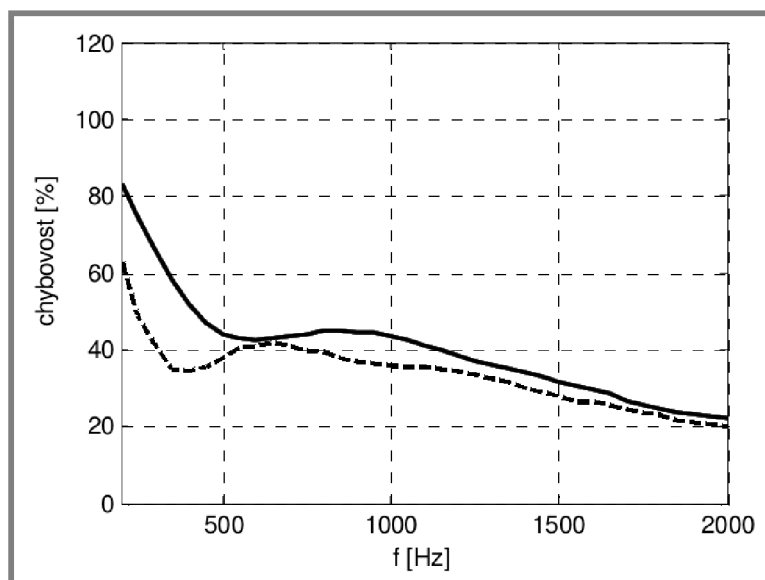


Obr. 21 Na levé části je patrný edge efekt metody NAH. Při použití metody SONAH tento nepříznivý jev zmizí (vpravo) [26].

<sup>7</sup> Díky tomuto faktu může být použito i zařízení určené pro beamforming, které má taktéž nepravidelné rozložení snímačů [24].



Velkou výhodou SONAH oproti NAH je to, že tato metoda pracuje přímo v prostorové oblasti. Díky tomu nedochází k některým chybám spojeným s diskrétní Fourierovou transformací – metoda SONAH má schopnost potlačit tzv. edge efekt, nepříznivý jev spjatý s měřením pouze části velkého zdroje zvuku, jako u metody NAH. Metoda SONAH do výpočtové matice doplňuje nuly omezující edge effect, jelikož dopředu předpokládá, že mikrofonní pole neměří celý zvukový zdroj. Porovnání metod NAH a SONAH ilustruje obr. 21 [26]. Při měření metodou SONAH nemusí být velikost pole větší než měřený zdroj.



**Obr. 22** Míra chybovosti v závislosti na frekvenci. Plná čára představuje NAH, čárkovaná pak SONAH [32].

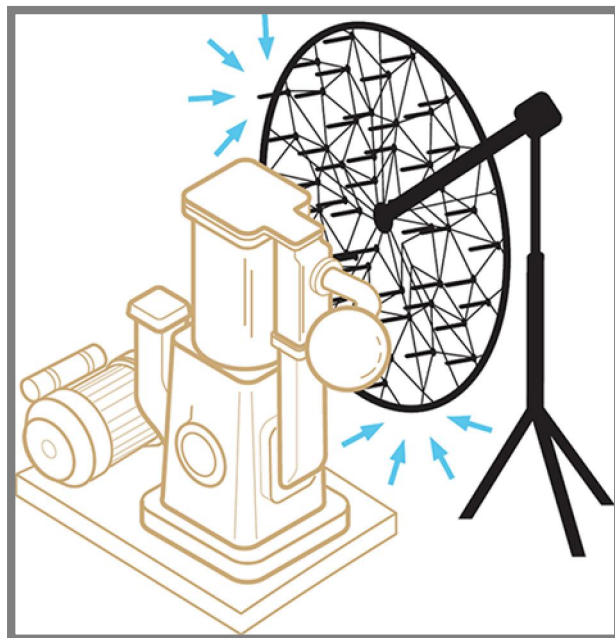
SONAH obecně vykazuje menší chybovost, pokud je mikrofonní pole umístěno blízko měřeného povrchu [22, 25, 32]. Také se dá konstatovat, že míra chyb se zvyšuje s rostoucí frekvencí. Je prokázáno, že metoda SONAH dosahuje přesnějších výsledků než metoda NAH (viz obr. 22). Výpočtové časy jsou oproti metodě NAH jen nepatrně delší.

## 2.3 Beamforming

2.3

Pokud chceme měřit zvukový zdroj o vysokých frekvencích, kvůli nutnosti velkého množství měřících bodů by nebylo možné použít metody akustické holografie. Stejný problém by se objevil, pokud by se z různých důvodů nedalo měřit v blízkosti zdroje zvuku nebo kdyby byl zdroj nadměrně velký. Pro takovéto případy se využívá jiná metoda, a to právě beamforming (obr. 23) [31].

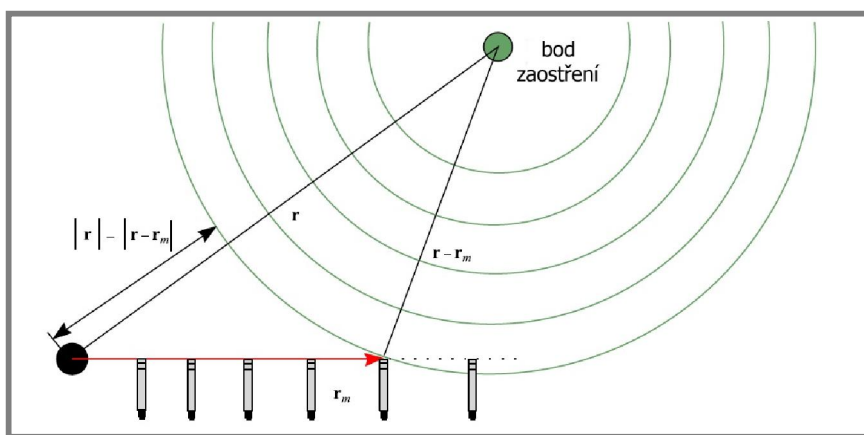
Beamforming je rychlá měřicí metoda určená pro lokalizaci zdrojů zvuku při měření ve středních až velkých vzdálenostech od zdroje. Beamforming obvykle umožňuje zobrazovat výsledky v reálném čase. Stejně jako akustická holografie pro měření využívá senzorové pole – v tomto případě jej lze nazvat anténou. Lokalizace zdroje je provedena odhadnutím amplitud rovinných (nebo sférických) vln šířících se směrem k anténě z vybraných směrů.



Obr. 23 Měření zvukového zdroje metodou beamforming [23].

Obr. 24 ukazuje princip metody beamforming. Podstatou je posuzování relativního zpoždění zvukových vln dopadajících na jednotlivé měřicí body. Tyto změřené zvukové signály se sčítají a zpoždění vln udává polohu akustického zdroje.

Zatímco akustická holografie nejčastěji poskytuje kalibrovanou mapu zvukové intenzity, beamforming vytváří tuto mapu bez měřítka [25]. Avšak existují způsoby, jak u těchto měření provést škálování intenzity zvuku.



Obr. 24 Princip metody beamforming na příkladu jednoho zvukového zdroje a roviny mikrofonního pole [31].

### 2.3.1 Princip metody

Princip funkce beamformingu lze přirovnat na příkladu antény [19, 31, 33]. Klíčovým principem inteligentních anténních technologií je adaptivní beamforming<sup>8</sup>. Beamforming obecně umožňuje upravovat svou směrovou charakteristiku. Směrové

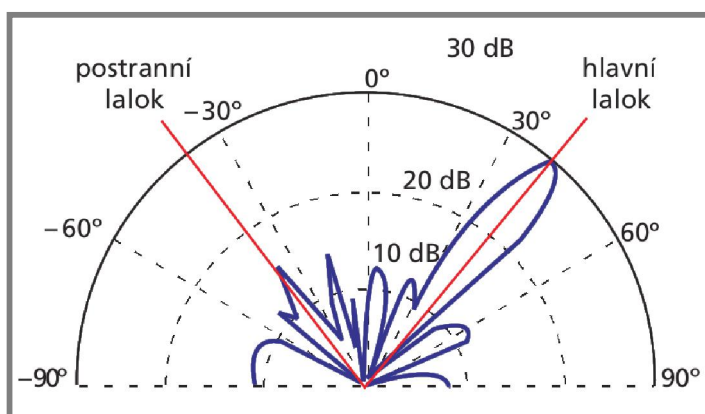
<sup>8</sup> Doslova přizpůsobivé tvarování paprsku.

antény oproti těm všesměrovým soustřeďují vyzařování či přijímání signálu jen do určitých směrů. V těchto směrech je signál zesílen v porovnání s ostatními směry. Schopnost antény přijímat či vyzařovat vlny s různou intenzitou v závislosti na směru se nazývá směrovost antény.

Metoda beamforming simuluje parabolickou anténu mající jednu osu citlivosti. Výpočty této metody probíhají ve velkém rozpětí úhlů dopadu, čímž dochází k pokrytí velké měřené plochy. V případě beamformingu je anténa přijímačem, která souběžně směřuje maximum přijímaného signálu do požadovaného směru a také nuluje nežádoucí a rušivý signál z jiných směrů.

#### Směrová charakteristika

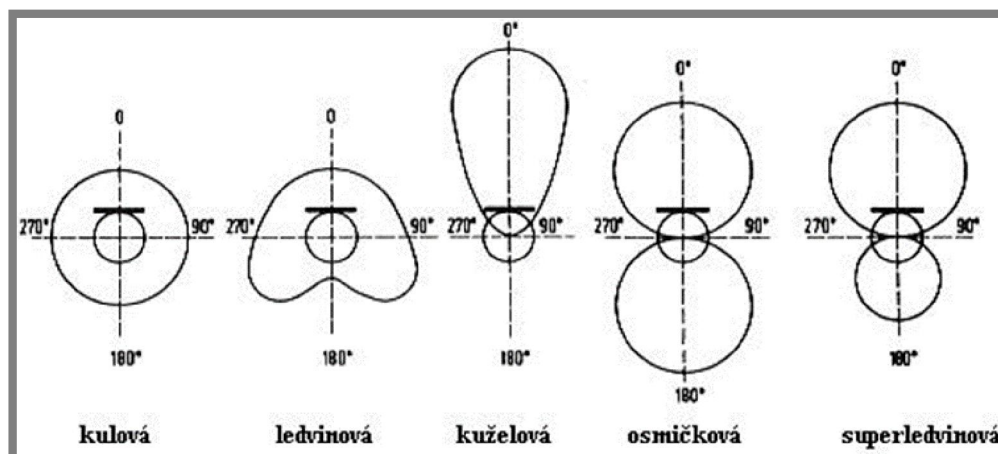
Směrová charakteristika zobrazuje, z jakého směru a jakou citlivostí mikrofonní pole přijímá akustický signál. Obvykle se zobrazuje jako vyzařovací diagram (viz obr. 25), kdy rovina představuje směry ve formě úhlových stupňů od osy citlivosti pole. Křivka pak zobrazuje průběh velikosti akustické intenzity přijímané v daném směru. Někdy se tento diagram zobrazuje jako rovinný řez (viz obr. 28).



Obr. 25 Směrová charakteristika beamformingu [31].

Základní typy směrových charakteristik jsou zobrazeny na obr. 26. Některé z těchto typů mohou mít větší množství ohnisek přijímaného zvukového signálu.

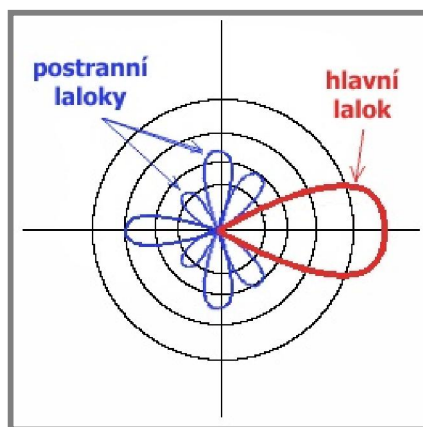
Směrová charakteristika se mění pro různé frekvence, jelikož ne všechny



Obr. 26 Typy směrových charakteristik beamformingu [34].

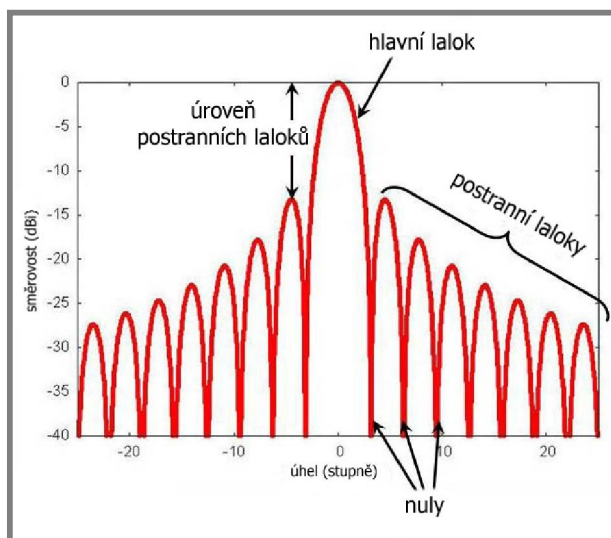
frekvence zvuku jsou z různých směrů snímány stejně. Proto je každá směrová charakteristika zobrazena jen pro určitý kmitočet.

Laloky ve směrové charakteristice se dají rozdělit na hlavní a postranní (obr. 27). Poloha hlavního laloku („main lobe“) určuje ohnisko měření, tedy odkud je zvukový signál především měřen. Čím je ve vyzařovacím diagramu tento lalok větší, tím je intenzivněji zvuk v daném směru přijímán. Anténa je tedy v místě hlavního laloku nejcitlivější. V ideálním případě by měl být lalok co možná nejúžší. Díky tomu bude mikrofonní pole schopno měřit zvuk přesněji z užší výseče směru. Při vyšších frekvencích dochází k zužování hlavního laloku a naopak, protože míru šířky charakteristiky v ohnisku lze vyjádřit poměrem vlnové délky  $\lambda$  ku průměru měřicího pole  $D$ .



Obr. 27 Hlavní a postranní laloky směrové charakteristiky beamformingu [35].

Ostatní menší laloky se nazývají postranní („side lobes“). Ty by měly být optimálně výrazně menší než lalok hlavní. Postranní laloky vytváří ve výsledné zvukové mapě šum – tzv. „duchy“. Přítomnost všech větších postranních laloků se do výsledné zvukové mapy výrazně projeví, jelikož beamforming bude zpracovávat i zvuky z jiných než žádoucích směrů. Dobré rozmístění mikrofonů na měřicím poli může výrazně omezit tyto nežádoucí prvky směrové charakteristiky.



Obr. 28 Rovinný řez směrové charakteristiky beamformingu [36].

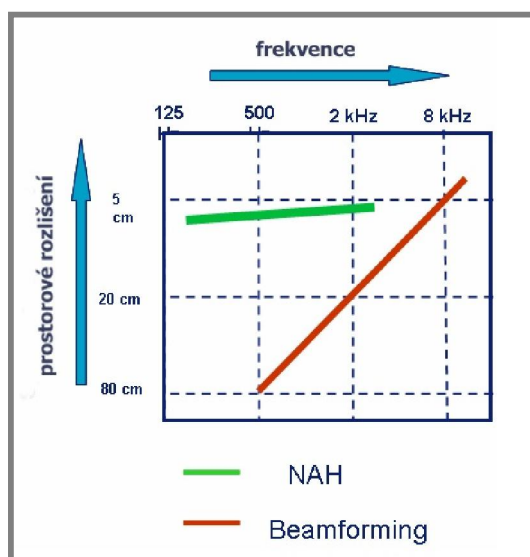
Velikost šumu a nepřesností záleží na poměru velikosti hlavního laloku a postranních laloků, což se nazývá dynamický rozsah. Čím je poměr menší, tím dochází k tvorbě většího množství „duchů“. Dynamický rozsah roste s rostoucí plošnou hustotou mikrofonů.

Metoda beamforming dokáže do určité míry naklánět hlavním lalokem, a to matematickým přepočtem zpoždění dopadajících akustických vln na anténu.

### 2.3.2 Omezení

2.3.2

Obr. 29 zobrazuje dosažitelné rozlišení v rovině zdroje u metod NAH a beamforming [25, 31]. Rozlišením v případě beamformingu je myšlena schopnost odlišit od sebe zvukové zdroje. Rozlišení je přesněji řečeno nejmenší úhlový rozestup mezi dvěma rovinnými vlnami o stejné síle, které mohou být od sebe na výsledné zvukové mapě ještě rozlišeny (viz obr. 31).



**Obr. 29** Dosažitelné rozlišení NAH a beamformingu v závislosti na velikosti měřené frekvence. NAH má relativně konstantní rozlišení, které je ale limitované rozsahem frekvence. Beamforming není nijak limitovaný, ale při nízkých frekvencích je rozlišení příliš malé [29].

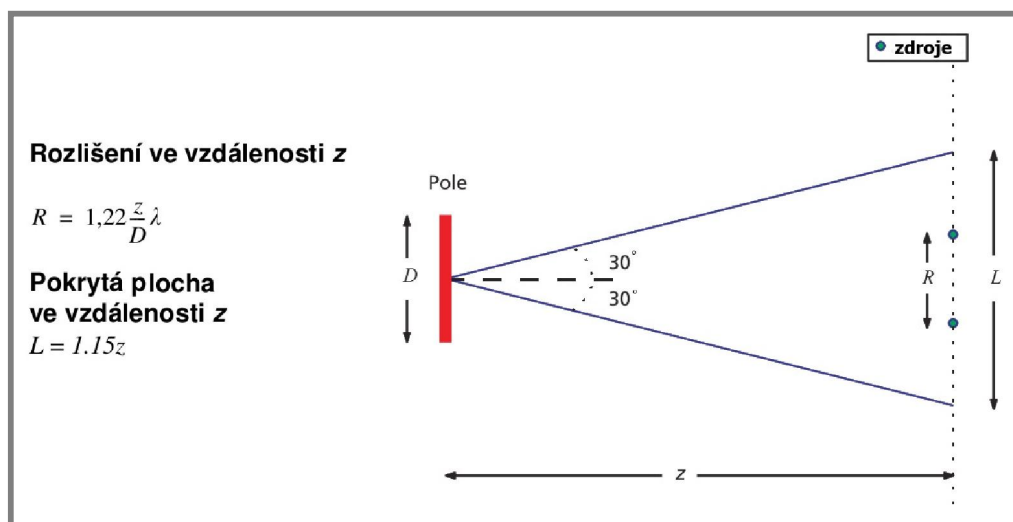
Pro rozlišení u beamformingu platí vztah:

$$R_{BF} \approx 1,22 * \frac{L}{D} \lambda \quad (2)$$

kde  $L$  je vzdálenost měření od zdroje,  $D$  je průměr měřicího pole a  $\lambda$  je vlnová délka měřeného zvukového signálu, vše v metrech (viz také obr. 30).

Z rovnice je zřejmé, že je rozlišení přímo úměrné vzdálenosti  $L$ . To platí, jelikož beamforming provádí směrový a úhlový rozklad zvukového zdroje. Kvůli zaostřovací schopnosti beamformingu je třeba mít všechny mikrofony namířené téměř rovnoměrně na všechny body měřené roviny. Měřitelná vzdálenost musí být tedy rovna nebo být větší, než je průměr měřicího pole  $D$ .

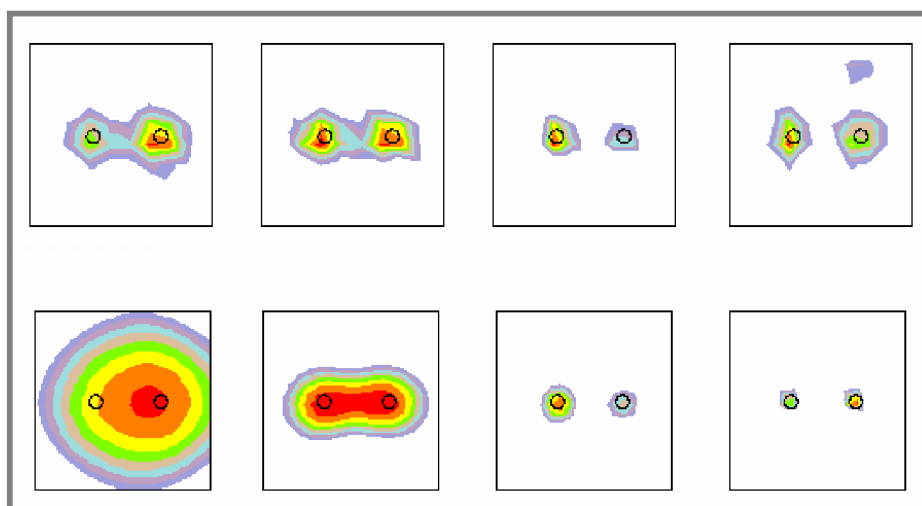
Pokud chceme dosáhnout dobrého úhlového rozlišení, tak průměr pole se senzory musí být mnohem větší než velikost vlnové délky. Z toho tedy plyne, že pro měření nízkých frekvencí by byla potřeba velmi rozměrná anténa, proto se v praxi beamformingem nízké frekvence z důvodu špatného úhlového rozlišení neměří.



Obr. 30 Veličiny ze vztahu pro  $R_{bf}$ . Vzdálenost  $R$  představuje dosažitelné rozlišení [31].

Aby bylo dosaženo co nejlepšího rozlišení, obvykle se využívá nejmenší možná měřitelná vzdálenost, kdy  $L \approx D$ . Rozlišení se výrazně zhoršuje při měření nad  $30^\circ$  od osy antény, tedy společně s předchozím předpokladem ( $L \approx D$ ) lze vyvodit závěr, že pro požadavek maximálního rozlišení je měřitelná plocha jen o něco málo větší než plocha antény. V případě umístění antény ve vzdálenosti  $L \gg D$  se rozlišení výrazně zhoršuje [29].

Za předpokladu  $L \approx D$  je prostorové rozlišení vzniklé zvukové mapy přibližně rovno velikosti jedné vlnové délky [27]. To platí, i když se měří těsně u zvukového zdroje.



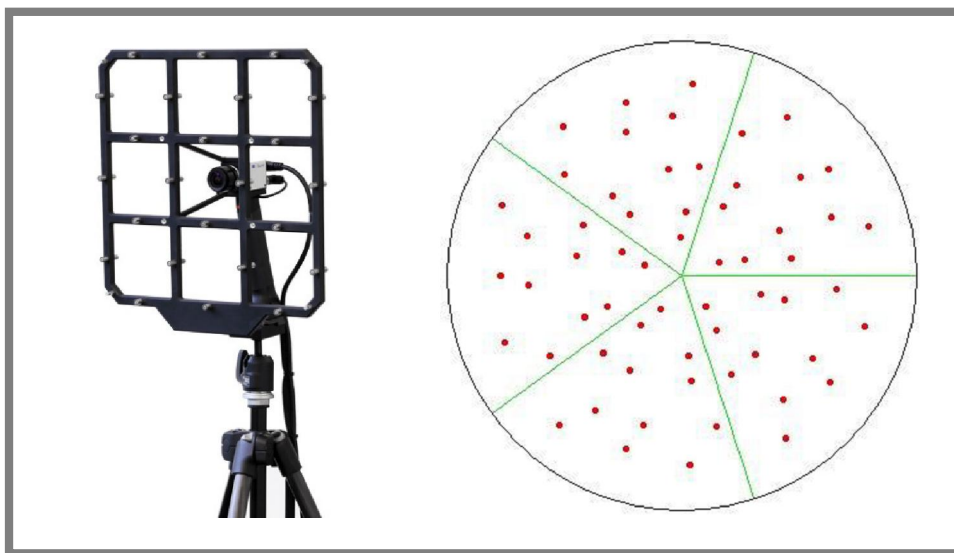
Obr. 31 Různé stupně prostorového rozlišení. Zvukové zdroje na levé straně splývají, vpravo jsou od sebe již odlišitelné [29].



Beamforming je určen pro střední až vysoké frekvence, obvykle minimálně od 1 000 Hz [19, 24, 27]. Dobrých výsledků může být dosaženo až do frekvencí, kde rozestup mikrofonů odpovídá velikosti dvou až tří (tři až čtyř [25]) vlnových délek měřeného zvuku<sup>9</sup>.

Na rozdíl od NAH beamforming nevyžaduje, aby měřicí pole bylo větší, než je velikost měřeného zvukového zdroje [25, 31].

Metoda beamforming neumožňuje pravidelné rozmístění senzorů na anténě, dokáže pracovat s náhodně (respektive pseudonáhodně) rozprostřeným polem mikrofonů. Mikrofony jsou na anténě rozmístěny uniformně, což vyjadřuje rovnoměrnou plošnou hustotu uspořádání mikrofonů. Obvykle je dosaženo nejlepších výsledků, pokud jsou rozestupy mezi každou dvojicí mikrofonů různé, což lze vidět na obr. 32.



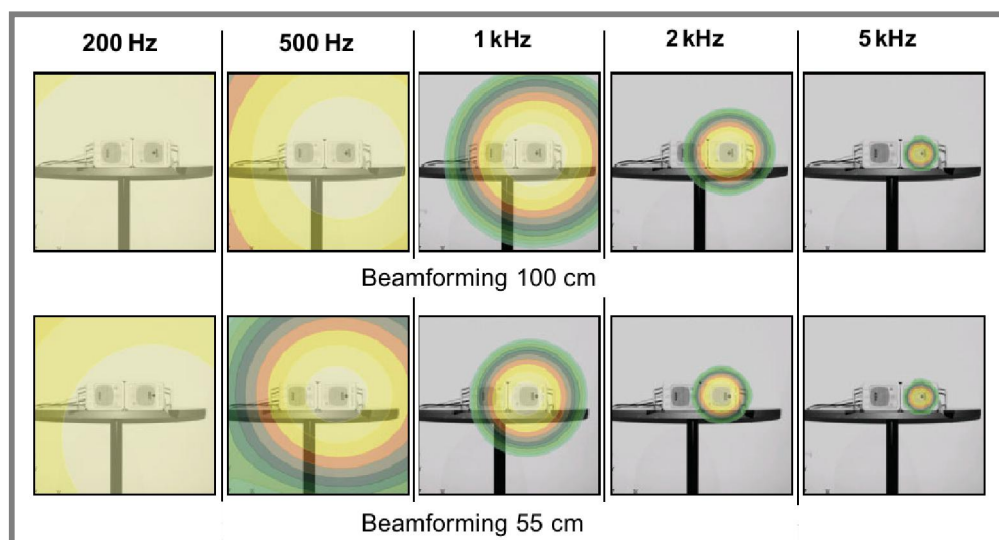
**Obr. 32** Uniformní rozptřeni mikrofonů použité na anténách značky Brüel & Kjær [24, 37].

Mimo blízké pole potlačuje pravidelné rozmístění senzorů prostorový aliasing velmi dobře. To platí, pokud je rozteč měřicích bodů menší než polovina vlnové délky. Při překonání této vzdálenosti aliasing skokově narůstá. Zato nepravidelné rozmístění senzorů vykazuje menší prostorový aliasing při zachování stejného průměrného rozestupu mikrofonů, a to i při výrazně vyšších frekvencích. Z toho se dá tedy vyvodit, že beamforming může měřit i vysoké frekvence s poměrně nízkým počtem mikrofonů.

Pokud se při metodě beamforming měří v malých vzdálenostech od zdroje, dochází k výraznému zvětšování postranních laloků ve směrové charakteristice [24, 25]. Nepravidelné rozmístění mikrofonů u velkého rozpětí frekvencí umožňuje dosáhnout výborných výsledků, a to z hlediska malé velikosti postranních laloků. To platí především pro frekvence, u kterých je polovina vlnové délky mnohem menší, než průměrný rozestup mikrofonů.

<sup>9</sup> Představme si kvadratickou oblast o velikosti čtyř vlnových délek. Zatímco by metoda NAH vyžadovala pro změření více než 64 měřicích pozic (pole minimálně 8x8), beamformingu by pro ty samé výsledky stačila pouze jedna pozice. Proto je beamforming vhodnější pro měření vyšších frekvencí [25].

Obr. 33 porovnává frekvence zvukového zdroje, vzdálenost měřicího pole od zdroje a výslednou akustickou mapu metody beamforming. Porovnání potvrzuje fakt, že je beamforming při nízkých frekvencích z důvodu malého rozlišení nepoužitelný. V případě menší vzdálenosti antény od zdroje je patrná lepší přesnost v lokalizaci intenzity hluku.



**Obr. 33** Akustické mapy metody beamforming, porovnání frekvence a vzdálenosti měření [25].



### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

**3**

---

#### 3.1 Analýza problému

**3.1**

---

Tlumiče jsou důležitým prvkem strojů a zařízení. Proto je výhodné umět tlumiče efektivním způsobem diagnostikovat. Diplomová práce se zabývá hodnocením technického stavu tlumičů za pomoci aplikace metod akustické diagnostiky.

Hlavní otázkou, na kterou se snaží tato práce nalézt odpověď, je, jestli lze diagnostikovat závadu funkce tlumiče na základě analýzy akustických projevů během provozu tlumiče. Při měření jsou využity bezkontaktní akustické metody dostupné na ÚK, metodika je odladěna především na vadě zavzdušnění tlumiče.

Jedním z největších problémů diplomové práce může být intenzita hlukových projevů vznikajících v tlumiči. Hluk způsobený vadou nemusí být dostatečně silný a hrozí, že splyne s vyzařovaným hlukem běžného provozu tlumiče. Dále je nutno zjistit, jestli budou akustické projevy tlumiče natolik intenzivní, aby mohly být měřeny mimo laboratorní podmínky. V případě splývání s okolním hlukem by bylo ideální měření provádět v akustické komoře.

Je třeba si vytvořit představu, v jakých místech a fázích zdvihu tlumicího cyklu by měl hluk vznikat, jelikož zdroj a průběh hluku budou nestacionární a časově závislý. Metody bezkontaktní diagnostiky mají z principu své funkce výhody i omezení. Proto je nutné vybrat vhodnou metodu, která by pak řešení hlavního problému práce v experimentální části nikterak neomezovala z technického hlediska.

#### 3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

**3.2**

---

První část rešerše je zaměřená na vady a hlukové projevy tlumičů. Odpovídá na otázku, kde vzniká v tlumiči hluk a jak se takové vady projevují na jeho funkci.

Neplynulé tlumení je spojené s nežádoucím zvukovým doprovodem, důvodem jsou třecí síly na pístu, otevírání a zavírání ventilů na pístu a průtok těmito ventily. Díky nespojitostem v odezvě se mohou tvořit vysokofrekvenční mechanické vibrace, které ústí v hluk. Tyto vibrace dosahují maximální frekvence 1 000 Hz, přičemž nižší frekvence mají větší míru zastoupení. Spodní hranice projevu se pohybuje mezi 100 až 200 Hz. Další vadou projevující se hlukem je kavitace, která nastává především při fázi komprese v místech škrticích elementů. Z rešerše plyne, že je nutné se při diagnostice zaměřit na píst a jeho blízké okolí. Je potřeba zkoumat vyzařovaný hluk v závislosti na aktuální poloze pístu. Hlukové emise byly v článcích citovaných v rešerši měřeny jak na jednovláškových, tak dvouvláškových tlumičích. Dá se tedy konstatovat, že dvouvlášková konstrukce tlumiče zřejmě výrazně neomezuje vyzařovaný hluk.

V druhé části rešerše je popsána akustická holografie a metoda beamforming. V případě akustické holografie je nutno zvukový zdroj měřit v blízkém poli, zatímco beamforming vyžaduje měření ve vzdáleném poli. To však pro řešení problému práce není rozhodující, jelikož by neměl být problém se s mikrofonním polem dostat k tlumiči na potřebnou vzdálenost.

Dále je nutno uvážit omezení ohledně velikosti měřicího pole. Při akustické holografii musí pole zcela pokrýt zvukový zdroj (pokud nepoužíváme metodu SONAH). Zato beamforming dokáže analyzovat zvukový zdroj výrazně větší, než je velikost antény. V porovnání velikosti mikrofonních polí a tlumiče by ani toto omezení nemělo hrát roli.

Největším omezením je rozsah měřitelných frekvencí obou metod. Z první části rešerše vyplývá, že vyzařovaný hluk dosahuje maximálně 1 000 Hz. Nízké frekvence jsou pro akustickou holografii optimální, beamforming ale pracuje se středními a vysokými frekvencemi. Z tohoto důvodu se jeví jako výhodnější využít metodu pracující na principu akustické holografie.

---

### 3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je návrh diagnostické metody, která bude schopna posoudit stav tlumiče za laboratorního provozu. Předpokládá se využití některé z metod pro lokalizaci nestacionárních zdrojů hluku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- výběr vhodné metody pro lokalizaci zdrojů hluku na tlumiči,
- formulace metodiky měření, stanovení podmínek pro měření,
- experimentální ověření navržené metodiky a vyhodnocení výsledků.

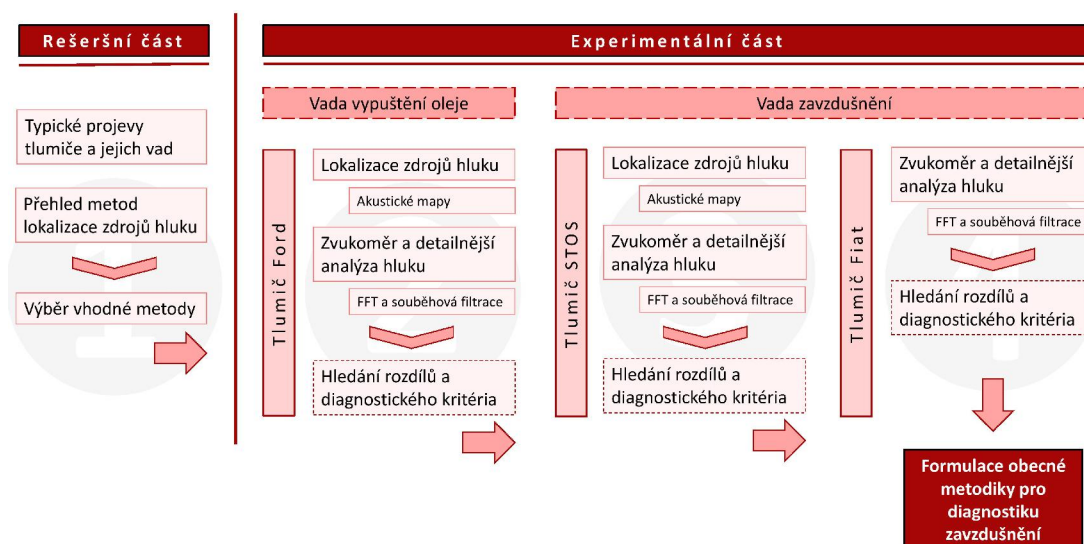
Dílčím cílem je vytvořit přehled možných vad automobilových tlumičů spojených s hlukem, popsat příčiny a projevy neplynulého tlumení a kavitace. Dále pak popsat bezkontaktní metody pro lokalizaci zdrojů hluku, vysvětlit jejich principy, výhody a omezení, a také možnosti využití. Tento přehled slouží pro návrh a optimalizaci nejvhodnější diagnostické metody, která bude v experimentální části použita. Následuje experimentální ověření a odladění metody tak, aby byla zvolená diagnostická metodika schopna z hlukových projevů identifikovat, případně kvantifikovat rozsah vady tlumiče.

## 4 MATERIÁL A METODY

Následující kapitola popisuje použitá zařízení, jak měřicí, tak měřené, včetně jejich parametrů. Dále jsou uvedeny měřicí metody společně s parametry experimentů a způsoby vyhodnocování dat.

### Schéma postupu řešení

Diagram zobrazuje postup řešení v jeho časovém sledu. Nejprve proběhla rešeršní část, kde byl vytvořen přehled typických hlukových projevů tlumiče a také byla vybrána vhodná metoda pro lokalizaci zdrojů hluku. V druhé, experimentální části probíhala série měření nejprve s vadou vypuštění veškerého oleje společně s poškozením pláště a poté se zavzdušněním. Tlumiče Ford a STOS byly měřeny mikrofonním polem a následně zvukoměrem, u tlumiče Fiat probíhalo měření pouze se zvukoměrem. Na závěr bylo na základě naměřených dat pro zavzdušnění stanoveno obecné diagnostické kritérium.



### 4.1 Použité zařízení

4.1

#### 4.1.1 Mikrofonní pole a systém PULSE

4.1.1

Pro lokalizaci zdrojů hluku je na ÚK dostupné měřicí mikrofonní pole od výrobce Brüel & Kjær, viz obr 34. Toto pole je stacionární a má kruhový tvar s pseudonáhodným rozložením mikrofonů [38]. Průměr pole je 850 mm a obsahuje 36 mikrofonů. Frekvenční rozsah tohoto měřicího zařízení je 100 Hz až 5 kHz s tím, že lze využít metody SONAH a Beamforming.

Pro úpravu naměřeného signálu slouží 36 kanálový analyzátor od výrobce Brüel & Kjær. S využitím notebooku a firemního softwaru „PULSE 19“, který obsahuje modul „Noise Source Identification“, je možné data dále zpracovávat a vyhodnocovat.

Z 2. kapitoly této práce vyplynulo, že hlukové projevy tlumiče spadají především do frekvenčních pásem pod hodnotu 1 kHz. Jelikož má každá z metod svá frekvenční omezení, která vyplývají z jejich principu funkce, pro experimenty bude

využita metoda SONAH pracující do hraniční nejvyšší frekvence 2 kHz, lépe však maximálně právě do 1 kHz. Princip této metody je vysvětlen v rešeršní části práce.



**Obr. 34** Využívané kruhové mikrofonní pole pro experimenty, výrobce Brüel & Kjær [2].

Měření metodou SONAH lze vhodně doplnit další referencí, v tomto případě polohou pístnice. Je očekáváno, že se velikost a poloha ohnisek hladin akustického tlaku bude měnit během cyklu zdvihu. Proto je vhodné naměřená data vyhodnocovat vzhledem k pohybové referenci, aby se daly konkrétní projevy tlumiče přiřadit k určité fázi zdvihu. Pro experimenty bude využit laserový senzor zdvihu. Díky zaznamenání okamžiku, kdy se nachází tlumič v úvrati, je software PULSE celé měření schopen „nakouskovat“ a zprůměrovat hlukové projevy ze všech naměřených cyklů do jednoho cyklu.

#### 4.1.2 Zvukoměr

Pro měření hlukových projevů tlumičů je využit přesný zvukoměr Brüel & Kjær typ 2270, viz obr. 35. Jedná se o ruční přenosný analyzátor zvuku [39].

Mikrofon tohoto zařízení pracuje s dynamickým rozsahem minimálně 123 dB (A) a jeho širokopásmový lineární rozsah spadá do intervalu 0,5 Hz až 20 kHz.



**Obr. 35** Využívaný zvukoměr typu 2270, výrobce Brüel & Kjær [40].

Maximální vzorkovací frekvence tohoto zařízení je 48 kHz.

Zvukoměr je ovládán dotykovou obrazovkou, přes kterou je možné zobrazit frekvenční analýzu měřeného hluku v reálném čase. Měřený signál je upravován pomocí analyzátoru DEWETRON (viz kap. 4.1.7).

Všechny mikrofony, jak měřicího pole, tak zvukoměru, jsou před každým měřením kalibrovány pomocí pistonfonu.

#### 4.1.3 Tlumič Ford

4.1.3

---

Tento tlumič slouží k tlumení nápravy automobilu, původně se nacházel ve vozu Ford Focus II Kombi. Před svým vyjmutím najel s vozidlem více než 130 tisíc km. I přes mírnou korozi povrchových částí je ale tlumič stále funkční (obr. 36). Tlumiči byl pro lepší manipulaci odřezán kovový kryt pístnice.



Obr. 36 Automobilový tlumič z vozidla Ford Focus.

Tlumič Ford má dvouplášťové konstrukční provedení. Ventily na pracovním pístu vyvozují tlumicí sílu průtokem tlumicí kapaliny. Spodní ventily umístěné na konci vnitřního válce zase zajišťují přepouštění oleje do vyrovnávacího prostoru s plynovým polštářem, díky čemuž se reguluje změna objemu pístnice ve vnitřním válci. Plynový polštář, který zabraňuje pění tlumiče, je tvořen vzduchem.

Zdvih tlumiče dosahuje přibližně 125 mm a tlumič vykazuje větší tlumicí sílu v tahové fázi.

#### 4.1.4 Tlumič STOS

4.1.4

---

Pro prvotní experimenty se zavzdušněním je využit tlumič STOS řady R110, viz obr. 37 a 38. Jedná se o horizontální typ tlumiče využívaného u kolejových vozidel, který tlumí vrtivé pohyby podvozku [41].

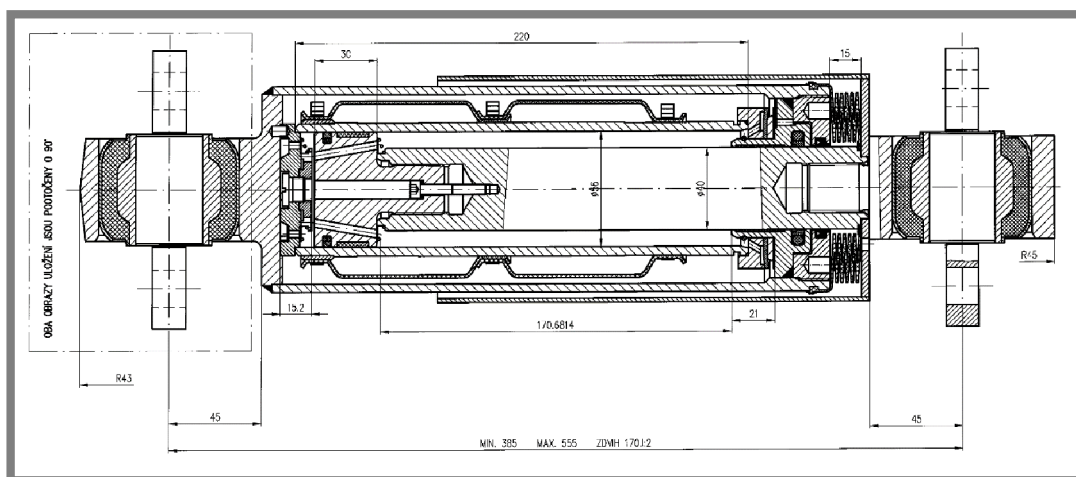
Tlumič STOS R110 spadá do kategorie dvouplášťových tlumičů. Tlumicí kapalina, v tomto případě olej, vyplňuje celý prostor vnitřního pláště a prostor mezi



Obr. 37 Využívaný tlumič pro experimenty, výrobce STOS.



vnitřním a vnějším pláštěm. Vyvozené tlumení je realizováno průchodem kapaliny přes jednotlivé jednosměrné ventily. Celý tlumič obsahuje tři skupiny ventilů: patní ventily v levé části nákresu, ventily v pístu a ventily umístěné poblíž těsnění pístnice v pravé části. Změna vnitřního objemu vlivem rozdílné míry zasunutí pístnice je kompenzována dvojicí gumových vaků naplněných plynem.



Obr. 38 Výkresový pohled řezu tlumiče STOS.

Pracovní průměr vnitřního pláště společně s pístem činí 56 mm. Zdvih tlumiče dosahuje  $170 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ . Výrobce udává, že tlumicí síla při rychlosti pístnice  $0,05 \text{ m/s}$  dosahuje velikosti  $7 \text{ kN}$ , a to v tahu i tlaku. Tlumení by mělo dle výrobce probíhat až do působících sil blížících se  $10 \text{ kN}$ . Celkový objem tlumicí kapaliny je přibližně  $800 \text{ ml}$ .

#### 4.1.5 Tlumič Fiat

Tento testovaný tlumič, jakožto zástupce typu automobilového tlumiče, se využívá pro tlumení nápravy u vozidla Fiat 500 (obr. 39).

Tlumič Fiat se řadí do kategorie dvouplášťových tlumičů. Doporučená hodnota natlakování vzduchového polštáře je rovna přibližně  $3,5 \text{ bar}$ . Celkový objem tlumicí kapaliny je přibližně  $125 \text{ ml}$ .

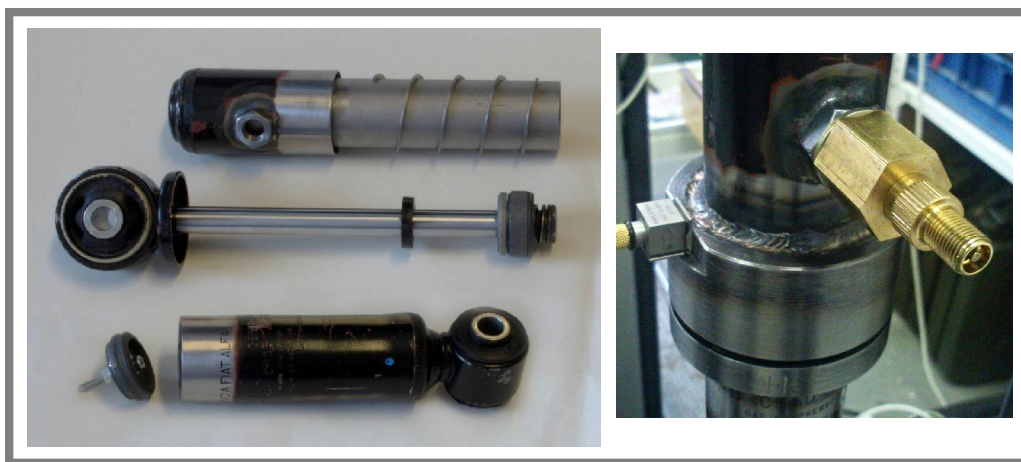


Obr. 39 Automobilový tlumič z vozu Fiat 500 [42].

Průměr pístu s vnitřním válcem činí  $28 \text{ mm}$ . Zdvih tlumiče dosahuje  $76 \text{ mm}$ . F-z charakteristika je v tahu i tlaku přibližně souměrná.

Tento typ tlumiče je dostupný ve dvou provedeních. První provedení představuje originální verzi tlumiče s optimální charakteristikou tlumení danou přímo od výrobce. Druhá verze tohoto tlumiče je adaptivní a slouží pro simulaci

závad. Vnější plášť se skládá ze dvou přibližně stejně velkých částí, plášť je tedy rozpůlen a jeho opětovné smontování je realizováno přes navařenou objímku se závitem. Dále je tato adaptivní verze v horní části opatřena zpětným ventilem (viz obr. 40), který slouží k regulaci množství tlumicí kapaliny a taktéž k natlakování vzduchového polštáře.



**Obr. 40** Adaptivní verze tlumiče Fiat. V levé části obrázku je tlumič rozebrán. Vpravo je patrná již úprava se závitovým spojením obou částí pláště tlumiče a také zpětný ventil.

#### 4.1.6 Hydraulický aktuátor Inova a rámová konstrukce

4.1.6

---

Jedná se o 1–kanálový hydraulický pulsátor, přesné označení je INOVA AH 40-150 M56 (viz obr. 41).

Celá stanice se skládá ze dvou částí, na spodní straně je umístěn hydraulický píst společně s hydraulickým obvodem. Zbytek zařízení tvoří pevný rám, na jehož



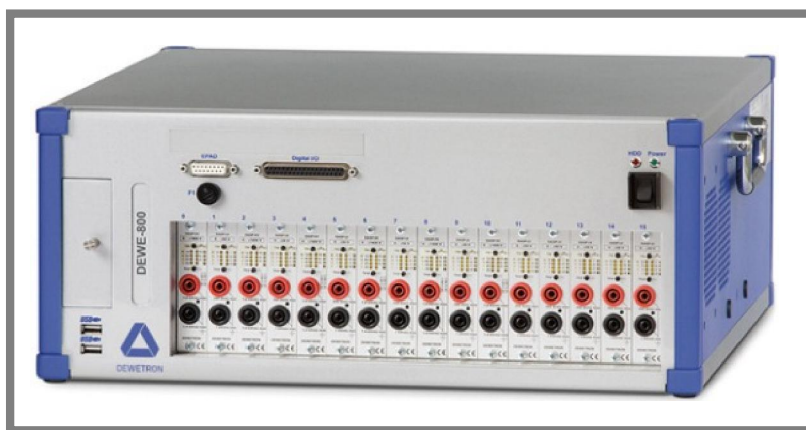
**Obr. 41** Aktuátor Inova a část původní rámové konstrukce.

horním posuvném ráhnu je umístěn siloměr. Dostupné siloměry mají měřicí rozsah od 10 N do 40 kN. Zástavba aktuátoru činí přibližně 1 500 mm, přičemž maximální zdvih pístu je 150 mm. Hydraulický obvod dokáže vyvinout maximální sílu 40 kN. Celé zařízení je ovládáno přes počítač speciálním softwarem.

Přibližně v polovině experimentů byla původní verze rámu (viz obr. 41) vyměněna za novou tužší verzi. Podstata funkce rámu a aktuátoru však zůstala stejná.

#### 4.1.7 DEWETRON a DEWESoft

Jakékoliv naměřené signály je nejprve nutné vést do analyzátoru, který převzorkuje signál pro post processing. Toto frontendové zařízení tedy upraví naměřený signál a s jeho pomocí lze data ukládat a dále zpracovávat. Bude využit analyzátor od výrobce DEWETRON, viz obr. 42.



Obr. 42 Využívaný analyzátor od výrobce DEWETRON [43].

Analyzátor typu DEWE-800 má kapacitu 16 slotů na vyměnitelné moduly. Tyto moduly slouží v měřicím řetězci jako předzesilovače a také jako hardwarové filtry – zesilují a filtrují signál kvůli potlačení šumu a jiných nežádoucích vlivů.

Toto zařízení disponuje klasickým Windows rozhraním, pro práci s měřenými daty je využíván software DEWESoft 7.0. Pomocí tohoto programu je možné data v reálném čase zobrazovat a uložit. DEWESoft bude využit také pro zpracování a vyhodnocování naměřených dat.

---

## 4.2 Měřicí řetězce

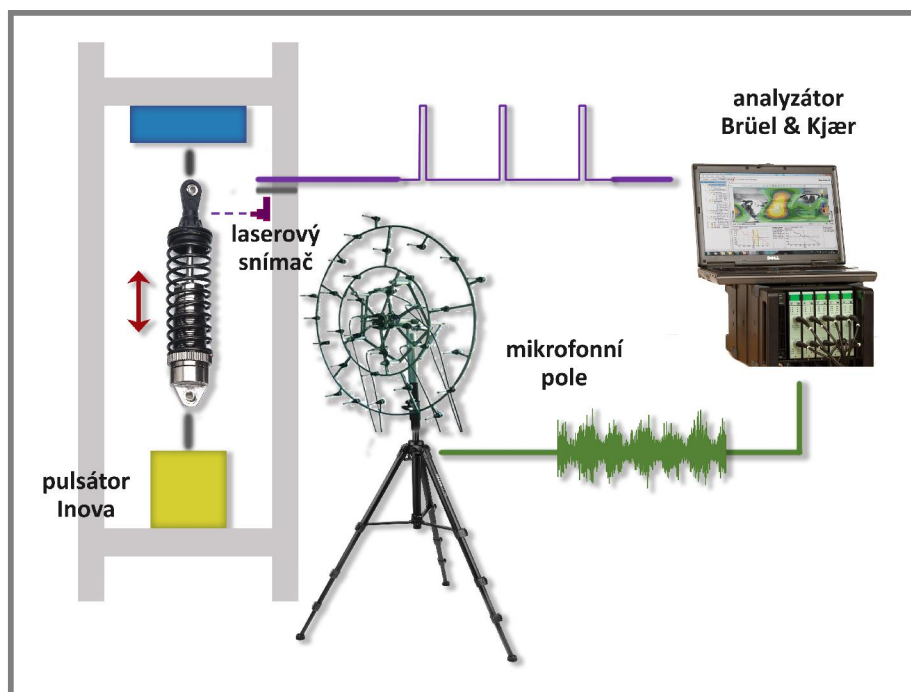
---

### 4.2.1 Měření pomocí mikrofonního pole

První typ měřicího řetězce se skládá z mikrofonního pole, analyzátoru Brüel & Kjær, laserového snímače a tlumiče, který je excitován pulsátorem Inova (viz obr. 43).

Naměřená data z jednotlivých mikrofónů jsou vedena šesticí kabelů do analyzátoru značky Brüel & Kjær. Data jsou dále posílána do notebooku, kde je možné akustické měření řídit a zobrazovat průběh akustických map. Laserový snímač je připevněn na konstrukci pulsátoru a je sepnut, když se tlumič nachází ve své dolní úvratí (snímá náběžnou hranu vnějšího pláště). Excitace je realizována hydraulickým aktuátorem Inova.





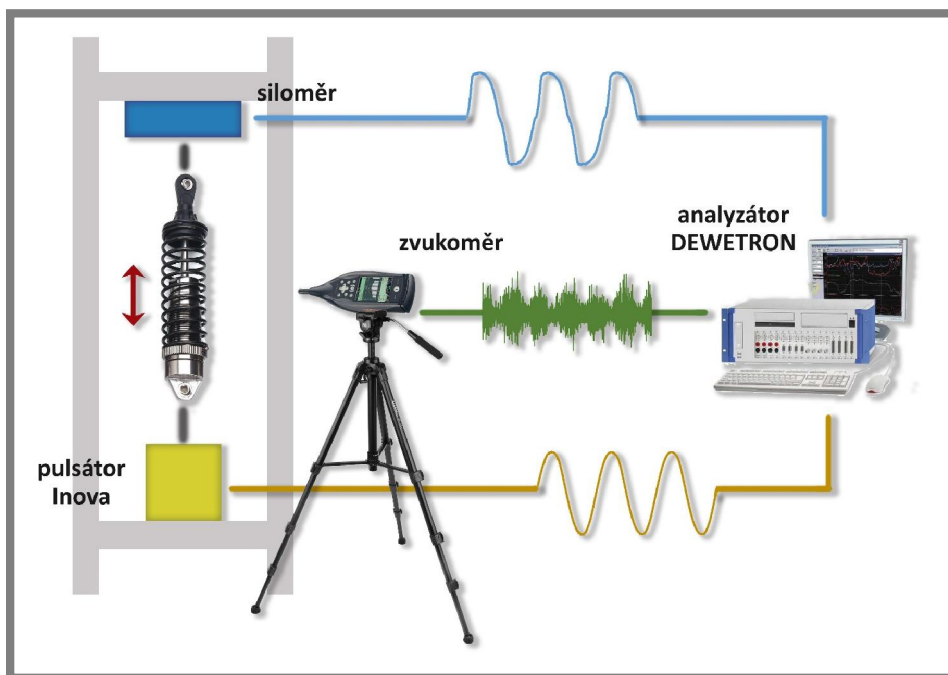
Obr. 43 Měřicí řetězec prvního způsobu měření, s mikrofonním polem.

#### 4.2.2 Měření pomocí zvukoměru

4.2.2

Druhý typ měřicího řetězce se skládá ze zvukoměru, analyzátoru DEWTRON, siloměru a tlumiče, který je opět excitován aktuátorem Inova (viz obr. 44).

Naměřené akustické projevy tlumiče ze zvukoměru jsou vedeny do analyzátoru DEWETRON. Siloměr společně s pulsátorem Inova je také propojen s analyzátelem a průběhy silového zatížení a zdvihu aktuátoru jsou spárovány s akustickým měřením. Excitace tlumiče opět probíhá pomocí pulsátoru.



Obr. 44 Měřicí řetězec druhého způsobu měření, se zvukoměrem.

### 4.3 Parametry experimentů

Pro experimenty je vhodné, aby se parametry excitace tlumičů co nejvíce přiblížily jejich reálným pracovním podmínkám, na které jsou optimálně navrženy. Na druhou stranu je potřeba takové excitace, aby se akustické vyzařování tlumičů dostatečně projevíly.

Konstantní frekvence testování tlumičů je volena dle příslušného grafu četnosti. Zdvih tlumiče STOS je pro experimenty roven 32 mm, v případě tlumiče Fiat a Ford je zdvih 40 mm. Excitace odpovídá tedy pracovním rychlostem tlumiče, což je pro všechny případy přibližně hodnota mezi 1 a 2 Hz. V tomto případě ale nemají hlukové projevy vždy svůj typický charakter, což se ukázalo v průběhu vstupních zkoušek. Tudíž v následujících experimentech excitace tlumičů probíhá i ve frekvenci 3 Hz, v případě tlumiče Ford a Fiat i ve frekvenci 4 Hz. Časové intervaly jednotlivých testů jsou maximálně 20 s, aby při vyšších frekvencích excitace nedošlo k přílišnému zahřátí oleje v tlumiči. Teplota je snímána kontaktním teplotním senzorem přes vnější válec, tato data jsou měřena pouze za kontrolním účelem a hodnoty nejsou ukládány.

Mikrofonní pole pro metodu SONAH je umístěno na stativu a postaveno ve vzdálenosti v intervalu 100 až 110 mm od vnějšího pláště tlumiče. Tím je splněna podmínka měření v blízkém poli zdroje hluku. Měřicí vzdálenost nemusí být v tomto případě stále stejná, jelikož se zjišťuje pouze rozložení hladin akustického tlaku (nebereme-li v úvahu experimenty pro přímé porovnávání dvou stavů).

Zvukoměr připevněný taktéž na stativu je umístěn v těsné blízkosti vnějšího pláště tlumiče, vzdálenost 40 mm je použita pro všechna měření. Zvukoměr je z hlediska výšky umístěn vůči tlumiči v jeho střední rovině.

Data jsou v případě měření zvukoměrem ukládána se vzorkovací frekvencí 20 kHz. Každé měření je spouštěno přes přednastavený trigger, když poloha pístnice prochází svou střední nulovou hodnotou. Trigger je využíván proto, aby začátky všech měření byly stejné, což zjednodušuje porovnávání a vyhodnocování jednotlivých měření.

Tlumič Ford se zdvihem 40 mm dosahuje pístových rychlostí 0,33 m/s při excitaci frekvencí 1 Hz, 0,48 m/s při 2 Hz, 0,60 m/s při 3 Hz a 0,73 m/s při 4 Hz. Stejný zdvih i pístové rychlosti dosahuje tlumič Fiat. Maximální tlumicí síly v experimentech nepřekračují u tlumiče Ford hodnotu 1 700 N v tahu a 650 N v tlaku; u tlumiče Fiat se jedná o sílu 630 N, přičemž tlumič vykazuje relativně symetrickou charakteristiku.

V případě tlumiče STOS při zdvihu 32 mm dosahují pístové rychlosti maximálních hodnot 0,22 m/s, 0,34 m/s a 0,39 m/s pro excitaci 1 Hz, resp. 2 Hz, resp. 3 Hz. Maximální tlumicí síly se blíží hodnotě 8 900 N, což je pod horním limitem, který je stanovený výrobcem.

### 4.4 Vyvolané vady na tlumičích

V tlumiči Ford je vyvolána nevratná forma poškození. Do obou plášťů je ve střední rovině tlumiče vyvrtán otvor o průměru 5 mm. Tímto otvorem je z vnitřního a vnějšího pláště následně vypuštěn veškerý olej, tlumicí účinek je tedy vyvozován pouze vzduchem a píst se dostává do kontaktu s nerovností na plášti. Otvor je na povrchu utěsněn.

Zavzdušnění je aplikováno na tlumiče STOS a Fiat, tato vada je vyvolávána uměle. Předpokladem je, že se kvůli zavzdušnění v tlumiči vyskytne v oleji kavitace. Velikost zavzdušnění je regulována postupným odběrem určitého množství oleje stříkačkou. Odšroubováním horního víka se stíracím kroužkem tlumiče STOS (obr. 45) a posuvem pístu mírně dolů dojde k protečení oleje do horní části válce, a zde již může být část oleje stříkačkou pohodlně odebrána. V případě tlumiče Fiat je množství oleje regulováno přes otvor pro zpětný ventil. Po opětovném našroubování ventilu je vzduchový polštář natlakovaný ruční pumpičkou.



**Obr. 45** Odšroubované horní víčko tlumiče STOS pro odběr oleje z důvodu zavzdušnění tlumiče.

## 4.5 Metody vyhodnocování

4.5

---

Z rešeršní části diplomové práce vyplývá, že jsou závady typického automobilového tlumiče lokalizovány poblíž pístu a vyskytují se v určitých fázích zdvihu, tyto vady by se měly akusticky projevit do frekvencí 1 000 Hz.

Z těchto závěrů plyne, že je nutné změřený akustický signál rozložit do frekvenčního pásma a tím zjistit míru zastoupení jednotlivých frekvencí (FFT). V naměřených datech je vhodné omezit takové frekvence, které neočekáváme a nejsou pro tlumič typické (FIR filtr). Dále je nutné se na hlukové projevy dívat i z časového hlediska, přiřadit hladiny akustického tlaku tlumiče příslušné fázi zdvihu a zároveň eliminovat nahodilé hlukové projevy (synchronní filtrace).

### 4.5.1 FFT (Fast Fourier transform)

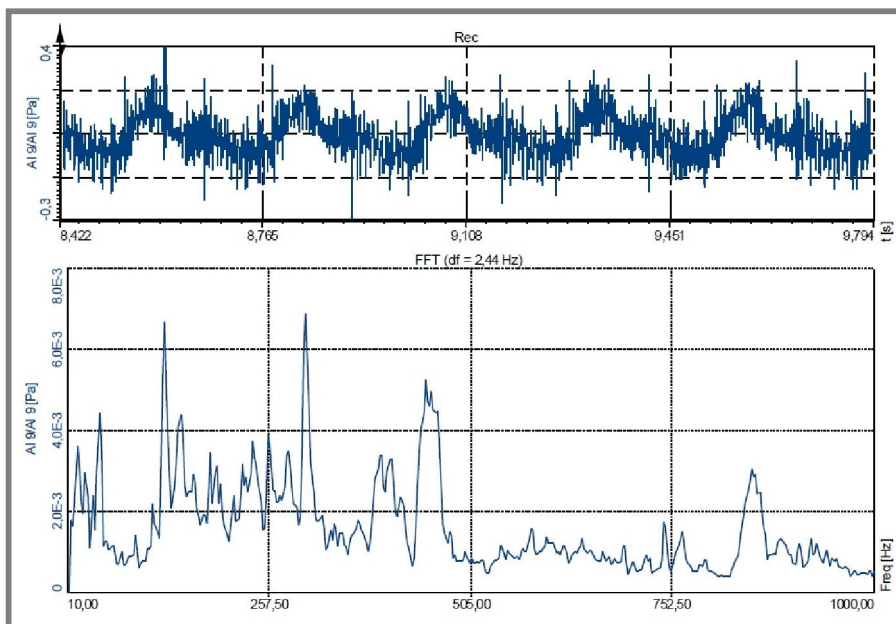
4.5.1

---

Jedná se o efektivní matematický algoritmus pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace [44]. Tato transformace slouží pro převod signálu z časové oblasti do oblasti frekvenční (obr. 46). Pro výpočet FFT je využit software DEWESoft.

Naměřený akustický signál je spojitá funkce měnící se v čase. Z takového křivky je ale pouhým okem velmi obtížné vyčíst jakékoliv informace o naměřeném

zvuku. Za dosti širokých podmínek je možné využitím harmonických funkcí (sinus a cosin) takovouto křivku matematicky vyjádřit. Naměřený akustický signál je proložen součty a integracemi harmonických funkcí, přičemž každá harmonická funkce má jinou váhu a fázový posun. Výsledkem je frekvenční spektrum – jednoduše řečeno přehled významnosti zastoupení jednotlivých frekvencí, které se v původním signálu vyskytují.



Obr. 46 Porovnání časové a frekvenční oblasti akustického signálu v programu DEWESoft.

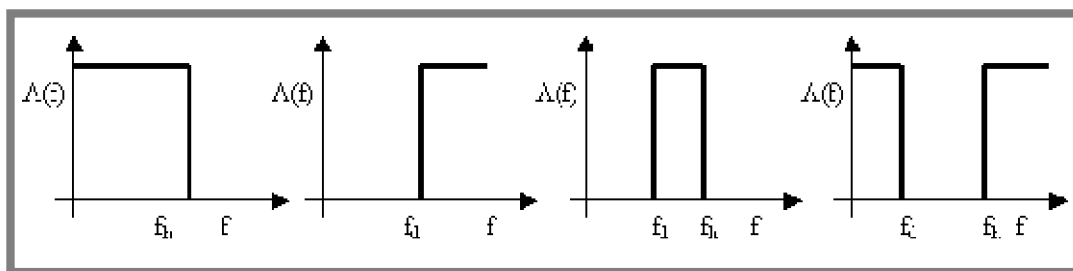
FFT lze z naměřeného akustického projevu tlumiče zpracovat dvěma způsoby. Buďto jako celkové FFT, tzn. staticky z celého naměřeného signálu, a výsledkem je tedy jeden graf. Anebo blokově (kvazistaticky), kdy je FFT vypočítávána pouze na částech celého naměřeného signálu a v různých časových úsecích se tento graf mění. FFT blokové historie je využito kvůli předpokladu, že se v různých částech zdvihu tlumiče obměňuje výskyt a významnost jednotlivých frekvencí.

#### 4.5.2 FIR filtr (finite impulse response)

Filtr s konečnou impulsivní odezvou slouží pro zpracování digitálních signálů. Využívá se pro úpravu frekvenčního spektra signálu. FIR filtry jsou stabilní, nehrozí jim rozkmitání, a zpracovávají signál souběžně v časové i frekvenční doméně.

Existuje několik typů tohoto filtru (obr. 47): „horní propust“ omezuje spodní část frekvenčního spektra a zároveň horní frekvence propouští, „dolní propust“ propouští naopak dolní část spektra a horní část zadrží. Dalším typem je „pásmová propust“, která propouští pouze zadaný interval frekvencí, a „pásmová zadrž“ naopak zadané frekvence omezí.

Nastavitelná strmost filtru ovlivňuje sklon přechodového pásma. Na obr. 47 je strmost filtru nekonečná, jedná se pouze o ideální případ. V reálných podmínkách je nutno definovat strmost tak, aby byly dostatečně potlačeny nežádoucí frekvence a zároveň bylo přechodové pásmo co nejmenší.



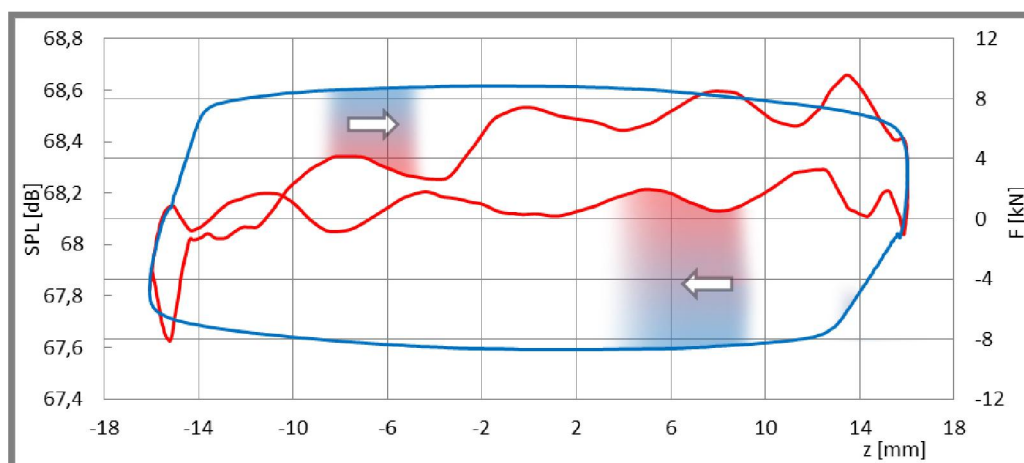
**Obr. 47** Příklady dolní propusti, horní propusti, pásmové propusti a pásmové zádrže. Jedná se o ideální stav, reálně není strmost přechodové charakteristiky nekonečná [45].

Pro aplikaci FIR filtru na měřená data je využíván modul DEWESoftu. Pro zvolenou vzorkovací frekvenci 20 kHz je volena strmost 2000 vzorků, tato strmost se pro příslušnou vzorkovací frekvenci jeví jako nejvhodnější.

#### 4.5.3 Synchronní filtrace

Synchronní filtrace je způsob vyhodnocování dat, který se využívá pro popis periodicky pracujících mechanismů či analýzu chování rotačních strojů. Vyhodnocování je prováděno průměrováním měřeného signálu v časové oblasti.

4.5.3



**Obr. 48** Příklad synchronní filtrace, hladina akustického tlaku [dB] v závislosti na zdvihu pístnice [mm] je znázorněna červeně. Graf je doplněn o F-z charakteristiku tlumiče (modře).

Výsledkem synchronní filtrace je v našem případě graf hladiny akustického tlaku v závislosti na pohybující se a opakující referenci. A to na poloze pístu, která se v jednotlivých cyklech pohybuje pravidelně. Hladina akustického tlaku pro vykreslený cyklus je zprůměrována z měření více cyklů. Na obr. 48 je dále naznačena souvislost mezi hlukem a zdvihem v určitých okamžicích tlumičového cyklu.

Výhodou synchronní filtrace je fakt, že jsou průměrováním omezeny ty hlukové projevy, které se v cyklu tlumení vyskytují nahodile. Touto eliminací nežádoucích hluků vyniknou i méně výrazné akustické projevy, které se vyskytují pravidelně právě v konkrétních fázích cyklu. Míra potlačení ruchů roste úměrně s počtem průměrování.

Pro výpočet a tvorbu grafů synchronní filtrace byla vytvořena šablona v programu Excel.



## 5 VÝSLEDKY

Následující kapitola popisuje výsledky experimentů v jejich časovém sledu. Také je uvedena logika a návaznost jednotlivých kroků, které dále vedou k definování hledané obecné diagnostické metodiky.

První část popisuje experimenty s tlumičem Ford s výraznou závadou v podobě vypuštění tlumicí kapaliny s poškozením pláště tlumiče. Takováto destruktivní vada vede k ověření pracovní hypotézy, že závada mění hlukové projevy tlumiče a je analýzou hluku detekovatelná. Druhá část se věnuje experimentům s vlakovým tlumičem vrtění STOS a snaží se aplikovat výše získané poznatky na běžnou závadu tlumiče –zavzdušnění. V třetí části je vyvoláno zavzdušnění v tlumiči Fiat pro stanovení metodiky diagnostiky právě pro automobilové tlumiče.

### 5.1 Tlumič Ford, odpuštění oleje

Tlumič Ford je v experimentech měřen nejprve ve svém původním stavu, kdy je i přes své značné opotřebení stále funkční. Poté je ve střední části pláště vyvrtán otvor a vypuštěna veškerá tlumicí kapalina.

#### 5.1.1 Lokalizace zdrojů hluku

Vstupní experimenty proběhly s tlumičem Ford a s využitím mikrofonního pole a pokročilé metody akustické holografie – SONAH (viz obr. 49). Hlukové projevy

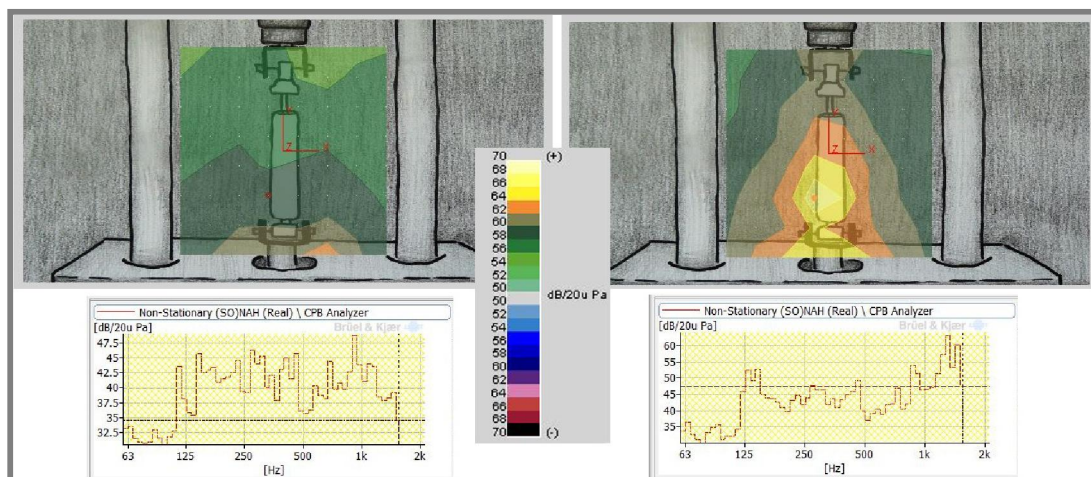


**Obr. 49** Průběh experimentu pro lokalizaci zdrojů hluku s využitím kruhového mikrofonního pole. Dolní úvrať cyklu tlumiče Ford je zaznamenávána laserovým senzorem.

tlumiče byly naměřeny nejprve v jeho původním stavu a poté proběhlo měření tlumiče stejnými excitacemi ve stavu s odpuštěným olejem. Cílem experimentů byla snaha odladit parametry metody SONAH a lokalizovat vadu v případě destruktivního poškození tlumiče.

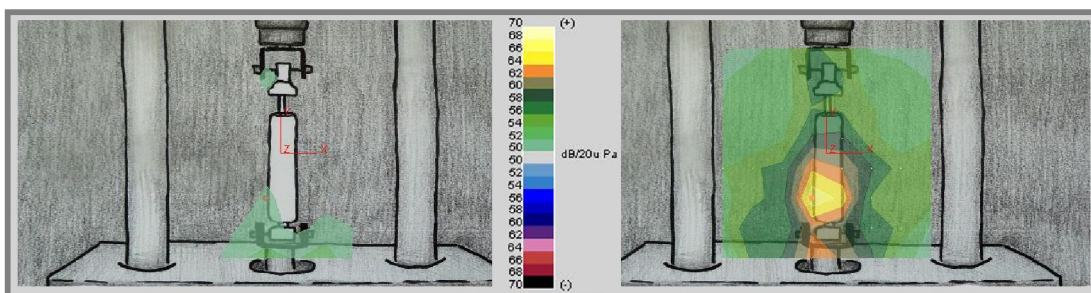
V programu PULSE jsou v rámci postprocessingu naměřených dat vytvořené jednak animace akustických map pro jednotlivé fáze cyklu zdvihu, a také akustické mapy za celý cyklus zdvihu tlumiče. Pro převod akustického signálu z časové do frekvenční oblasti je použit typ 1/3 oktávové analýzy, počet čar je volen 6400. Reference pohybu je převedena na úhel, tzn. že celý cyklus zdvihu představuje 360 stupňů. Zdvih je rozdělen na 40 částí – 40 samostatných akustických map. Jsou také vypočteny celkové FFT hluku pro všechna jednotlivá akustická měření (původní stav a stav poškození, excitace 1–4 Hz). V těchto měřeních jsou analyzovány hlukové projevy do výše frekvencí 1,8 kHz.

Nejprve je otestováno možné zkreslení měření vlivem akustického pozadí. Aktuátor Inova je excitován bez namontovaného tlumiče, poté je naměřen hluk aktuátoru s tlumičem. Ukazuje se, že hlukové pozadí dosahuje v měřeném frekvenčním pásmu hodnot kolem 35 dB. Projevy tlumiče v nepoškozeném stavu přesahují 45 dB a při poškození se blíží až 60 dB. Rozdíl je natolik významný, aby při porovnání obou stavů mohl být hluk akustického pozadí zanedbán.



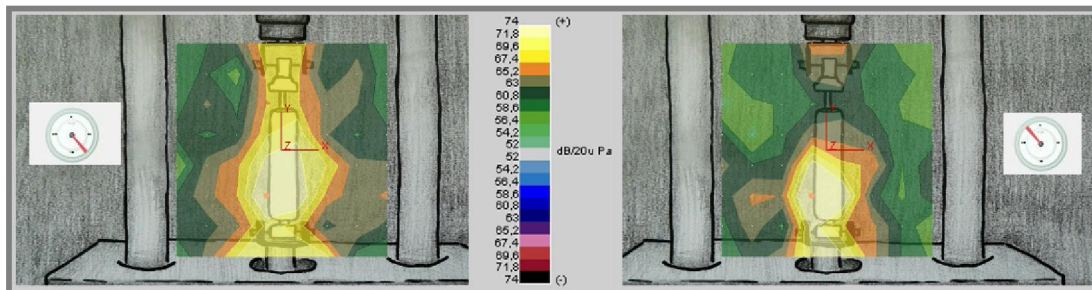
**Obr. 50** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih společně s celkovou FFT hluku. Tlumič v původním stavu (vlevo) se projevuje méně intenzivně než poškozený tlumič (vpravo). Excitace tlumiče 2 Hz.

Při porovnání celkového stacionárního hluku, zprůměrovaného za celý cyklus zdvihu tlumiče, je patrný značný rozdíl mezi poškozeným tlumičem a jeho původním stavem (viz obr. 50). Poškozený tlumič se projevuje hlukově intenzivněji, a to až o 10 dB. Tento rozdíl je výrazně patrný u excitací tlumiče 2, 3 a 4 Hz (viz příloha I). Zatímco u původního stavu tlumiče se v FFT grafu nevyskytují žádné významné frekvence, v případě poškozeného tlumiče lze spatřit hned několik peaků v oblasti



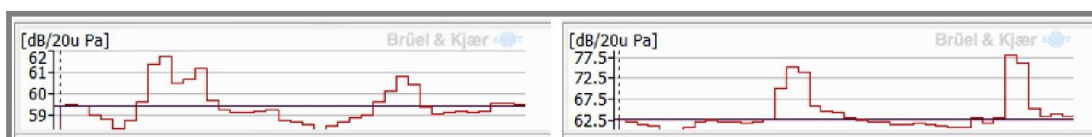
**Obr. 51** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih, pásmo 950 až 1 600 Hz. Vlevo původní stav tlumiče, vpravo poškozený tlumič. Excitace tlumiče 3 Hz.

nad 1 kHz. Hlukový projev „klepnutí“, které se vyskytovalo v případě poškozeného tlumiče, lze lokalizovat na frekvenčním pásmu přibližně 950 až 1 600 Hz (viz obr. 51). Ve zmíněném pásmu lze u poškozeného tlumiče lokalizovat výrazný hluk v oblasti pístu, zato v případě tlumiče v původním stavu jsou hlukové projevy poblíž pístu minimální. Rozdíl na tomto pásmu je významný opět u hodnot excitací 2 až 4 Hz (viz příloha II).



**Obr. 52** Akustické mapy hlukového projevu „klepnutí“ poškozeného tlumiče Ford, pásmo 950 až 1 600 Hz. Vlevo první „klepnutí“, vpravo pak druhé. Ciferníky představují danou fázi zdvihu tlumiče z jeho celého cyklu, a to ve formě 0 až 360 stupňů. Excitace tlumiče 4 Hz.

Při zobrazení naměřených dat v časové oblasti (hluk celého zdvihu je rozdělen na 40 dílů) platí, že se výše zmíněné hlukové ohnisko poškozeného tlumiče vyskytuje pouze v určitých fázích zdvihu (viz obr. 52). A to konkrétně dvakrát za cyklus zdvihu, jelikož se píst dostane do kontaktu s nerovností na plášti tlumiče jednou při kompresy a podruhé při extenzi tlumiče. Ve frekvenčním pásmu přibližně 950 až 1780 Hz tento hlukový projev přesahuje hodnotu až 74 dB, zatímco v datech původního stavu tlumiče se toto ohnisko v daných fázích zdvihu vůbec nevyskytuje a hluk v oblasti pístu nepřesahuje hodnoty 54 dB, což platí pro všechny frekvence excitací tlumiče (viz příloha III). Intenzita hluku pro celé měřené frekvenční pásmo je zobrazena na obr. 53. Z obou grafů je opět patrný rozdíl, kdy v případě poškozeného tlumiče se v celém intervalu zdvihu vyskytuje výrazný hluk v podobě dvojice „klepnutí“.



**Obr. 53** Celková FFT vyzařovaného hluku tlumiče Ford za celý interval zdvihu, frekvenční pásmo 0–1,8 kHz. Vlevo původní stav tlumiče, vpravo poškozený tlumič. Excitace tlumiče 2 Hz.

Pro frekvenční pásmo přibližně 200 až 300 Hz se na akustických mapách objevuje hluk u spodního a levého okraje mapy, a to pro všechna měření. Takovéto projevy by mohly být přiřazeny hluku od aktuátoru Inova a pásmo 200–300 Hz by tedy mohlo odpovídat jeho pracovním frekvencím.

Metoda lokalizace zdrojů hluku dokázala úspěšně rozlišit mezi fungujícím a poškozeným tlumičem, zobrazit ohniska hluku a přiřadit je ke konkrétní fázi zdvihu. Další snahou je vyhodnotit rozdíly hluků tlumiče měřené zvukoměrem za pomoci detailnější analýzy akustického signálu.



### 5.1.2 FFT a synchronní filtrace

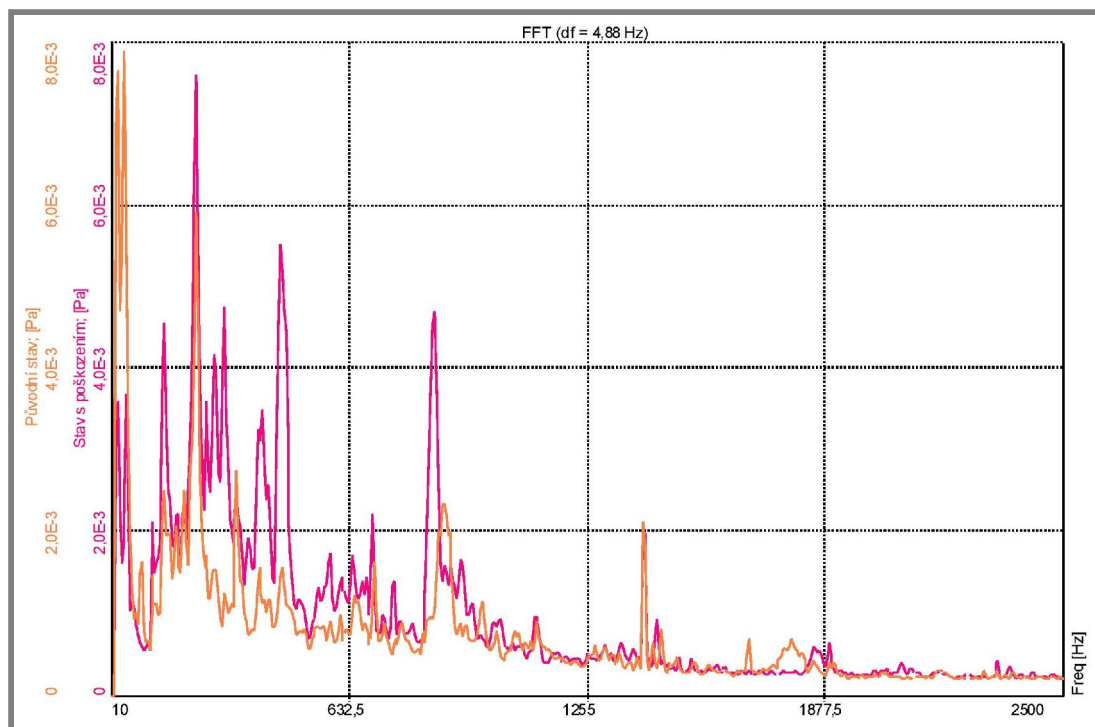
Následující série experimentů opět využívá tlumič Ford, a to ve stavu původním a s poškozením (vypuštění oleje a porušení pláště), kdy jsou oba stavy měřeny za totožných podmínek (stejně parametry excitace a nastavení měřicího řetězce). Hluk je měřen zvukoměrem (viz obr. 54) a následně je proveden hlubší rozbor akustických dat FFT analýzou a aplikací synchronní filtrace. Další snahou je rozdílné hlukové projevy tlumiče jednoduše kvantifikovat, zjištěné rozdíly by mohly vést k nalezení vhodných diagnostických kritérií pro běžnější závady tlumičů.



**Obr. 54** Průběh experimentů se zvukoměrem, nejprve je naměřen hluk původního stavu tlumiče Ford, poté hluk tlumiče s vypuštěným olejem a poškozeným pláštěm.

Nejprve jsou v programu DEWESoft vypočteny a analyzovány FFT grafy hluku pro jednotlivé excitace tlumiče. Jednak jsou vykresleny FFT křivky hluku za celé měření, dále pak také FFT křivky blokové historie pro analýzu změny frekvenčního spektra v čase. Vzorkovací frekvence činí 20 kHz. Pro výpočet celkového FFT je využit počet čar 5 000, v případě FFT blokové historie je použito 1 200 čar – zde se jedná o kompromis mezi dostatečným počtem čar a zároveň relativně krátkým časovým blokem pro zobrazení spektra v určité fázi zdvihu. Dále je voleno okno typu Hanning a přesah 75 %, jedná se o doporučenou hodnotu.

Dle průběhu těchto křivek je pak frekvenční spektrum rozděleno na několik samostatně posuzovaných frekvenčních pásem. Ty jsou vybírány na základě velikosti peaků signálu a jejich změně v čase. Pásmo jsou vypočtena přes FIR filtry v DEWESoftu, počet prvků je volen 2 000 (zaručuje optimální strmost náběhu filtru) a okno je typu Hanning. Na závěr jsou hodnoty akustického tlaku přepočteny na hladiny akustické intenzity. Data jsou následně exportována do Excelu, kde jsou vykresleny průběhy hluku s využitím synchronní filtrace, a to pro jednotlivá frekvenční pásma a frekvence excitace tlumiče zvlášť. Synchronní filtrace průměruje data vždy nejméně z několika desítek cyklů, přičemž se nepočítá s několika prvními cykly, kde ještě nedocházelo k ustálení F-z charakteristiky a s tím i hluku.



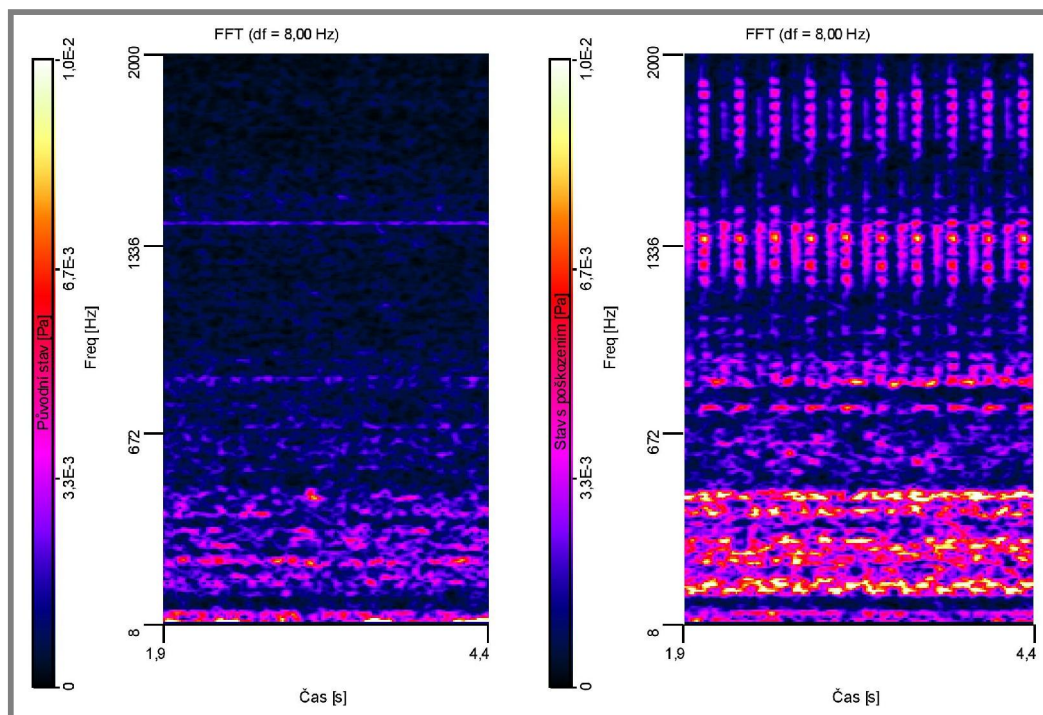
**Obr. 55** Frekvenční spektrum akustického signálu tlumiče Ford. Oranžová – původní stav tlumiče, růžová – poškozený tlumič. Excitace tlumiče 1 Hz.

Na obr. 55 jsou zobrazeny frekvenční spektra hluku tlumiče Ford. Z křivek plyne, že hluk poškozeného tlumiče je výrazně hlasitější než hluk tlumiče v původním stavu. A to především v pásmu přibližně 120–470 Hz (ve kterém jsou předpokládány i projevy pulsátoru). Také je u poškozeného tlumiče výraznější projev peaku přibližně 850 Hz, který má ale při různých excitacích tlumiče stále stejnou velikost. „Klepání“ (přejetí pístem přes vyvrtaný otvor) se projevuje na frekvenčním pásmu přibližně 1150 až 2000 Hz, hlukové projevy této vady se vzrůstající frekvencí excitace výrazně narůstají.

Pro zobrazení rozdílných hlukových projevů v čase slouží grafy se 3 osami – osa  $x$  představuje čas, osa  $y$  pak frekvenční spektrum a osa  $z$  míru zastoupení dané frekvence dle barevné škály. Frekvenční spektra obou tlumičů zřetelně ukazují rozdíl mezi původním a poškozeným stavem (viz obr. 56). Na vyšších frekvencích se u poškozeného tlumiče vyskytují pravidelné hlukové projevy závady „klepání“.

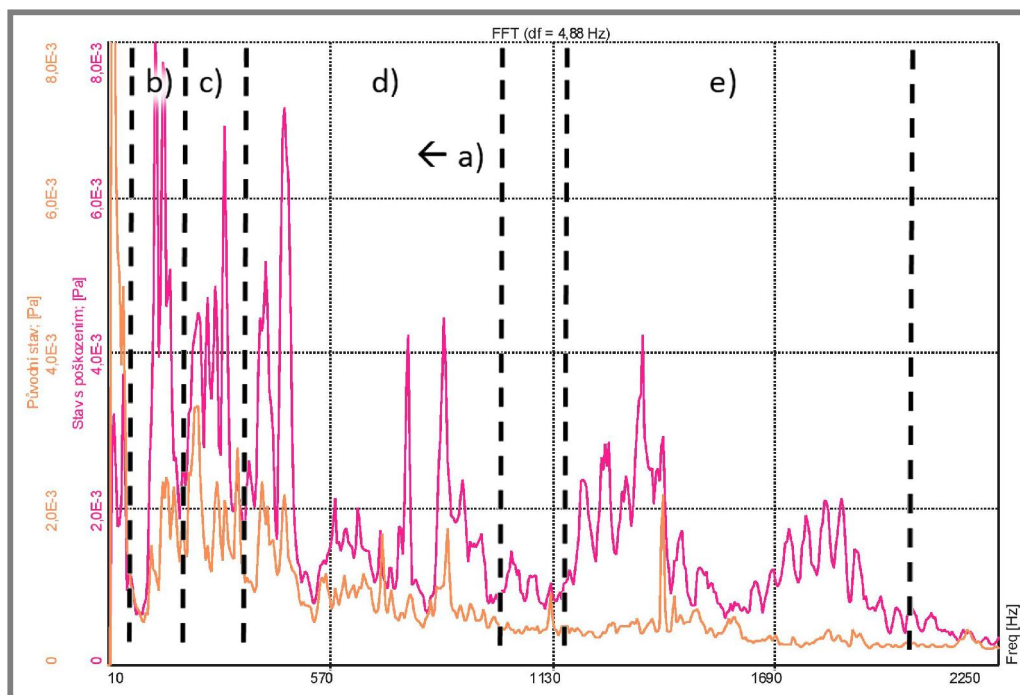
**Tab. 1** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič Ford.

Frekvenční pásmo		Předpoklad
a)	1 000 Hz dolní propust	Pásmo nejvýraznějších projevů
b)	65–205 Hz	Projev práce tlumiče
c)	205–360 Hz	Vlastní frekvence pulsátoru
d)	360–1 000 Hz	Projev práce tlumiče
e)	1 150–2 000 Hz	Pásmo projevu závady



**Obr. 56** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič Ford. Vlevo původní stav, vpravo tlumič s poškozením. Excitace tlumiče 4 Hz.

Následně jsou frekvenční spektra hluku tlumiče rozdělena na jednotlivá frekvenční pásma, což dokládá obr. 57 společně s tab. 1. Jako první pásmo byla zvolena dolní propust 1 kHz, jelikož většina intenzivnějších hlukových projevů se vyskytuje do této hranice frekvencí. Jako pásmo projevů aktuátoru Inova byly

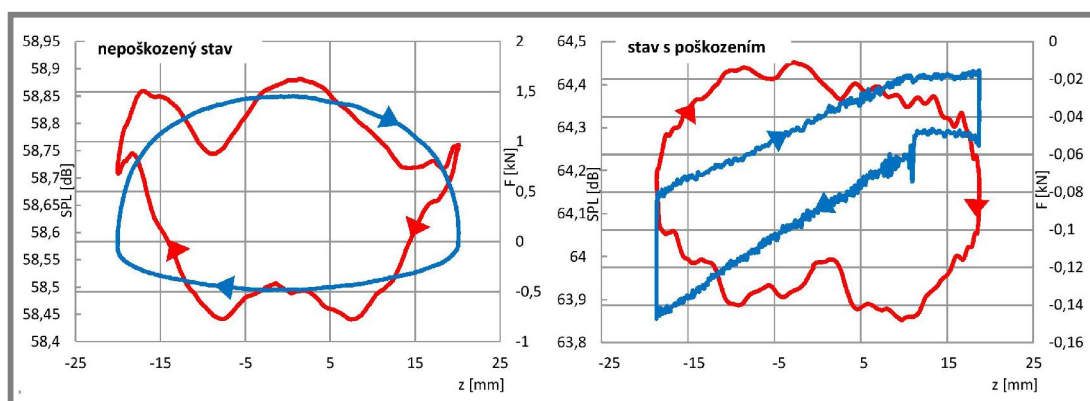


**Obr. 57** Rozdělení frekvenčních spekter akustického signálu tlumiče Ford na jednotlivá pásma. Rozsahy pásem jsou vypsány v tab. 1. Oranžová – původní stav tlumiče, růžová – poškozený tlumič. Excitace tlumiče 4 Hz.



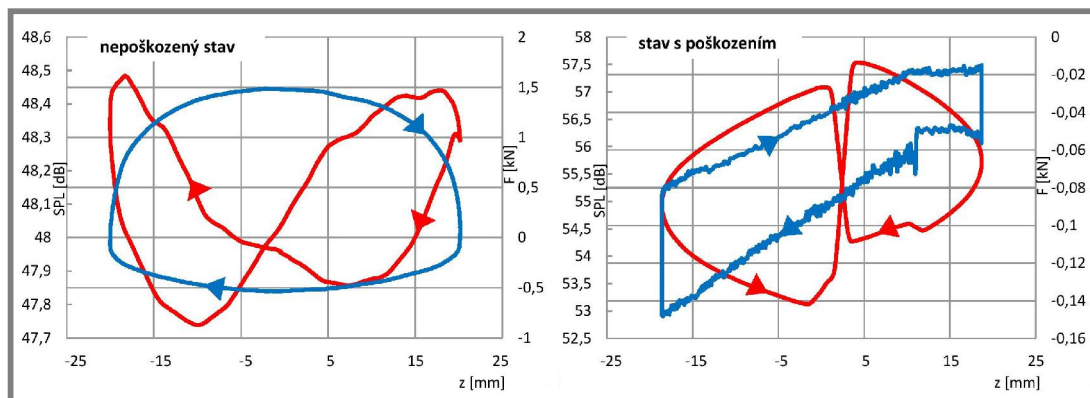
voleny frekvence 205–360 Hz, další dvě pásma na tento interval navazují. Poslední pásmo je voleno na frekvenčním rozsahu 1 150–2 000 Hz, kde výrazně vzrůstají dané frekvence u poškozeného tlumiče pouze v určitých fázích zdvihu, tedy mohlo by se jednat právě o projev vady.

Akustické projevy jsou ve výše definovaných pásmech sledovány pro každou frekvenci excitace tlumiče samostatně, následně jsou z těchto dat vytvořeny příslušné grafy synchronní filtrace. Při pohledu na křivky synchronních filtrací pro pásma *a)*, *b)*, *c)* a *d)* nejsou z průběhů hluku patrné žádné zásadní a pravidelně se vyskytující rozdíly mezi oběma stavy tlumiče. Obr. 58 ilustruje tento fakt pro dolní propust 1 000 Hz a excitaci 3 Hz. Zásadní rozdíl může být spatřen však v F-z charakteristice obou typů tlumiče. Zatímco v případě původního stavu tlumiče je průběh tlumicí síly na zdvihu relativně standardní, u poškozeného tlumiče je křivka velmi atypická a tlumicí síla dosahuje velmi malých hodnot (maximum 160 N).



**Obr. 58** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) obou stavů tlumiče Ford. Excitace 3 Hz, dolní propust 1 000 Hz.

Ve frekvenčním pásmu *e)* již ale nastává u grafů synchronních filtrací zásadní rozdíl mezi oběma stavy tlumiče (viz obr. 59). V případě tlumiče s vadou je na průběhu křivky hluku vidět prudký nárůst intenzity zvuku, a to dvakrát za cyklus zdvihu. Tento nárůst nastává pro všechny hodnoty excitace tlumiče ve stejný okamžik. Na křivkách je tedy zachyceno právě „klepnutí“, které bylo v tomto frekvenčním pásmu předpokládáno. Obdobný hlukový projev v případě křivek



**Obr. 59** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) obou stavů tlumiče Ford. Excitace 3 Hz, pásmová propust 1 150–2 000 Hz.

původního stavu tlumiče zcela chybí. Vybrané grafy synchronní filtrace pro různá pásma a excitace jsou v příloze IV.

#### Stanovení diagnostického kritéria

Následnou snahou je kvantifikace výše zmíněných rozdílů společně s nalezením možného diagnostického kritéria pro tento typ vady tlumiče. Hluk poškozeného tlumiče je evidentně významně hlasitější než tlumiče v původním stavu, a to přes všechny frekvence excitace. Proto se nabízí porovnání celkové zvukové energie emitované tlumičem, což může být vyjádřeno integrací křivky hluku – kritérium bude tedy zohledňovat obsahy ploch pod křivkou akustických tlaků.

Vypočtené hodnoty pomocí kritéria se nacházejí na obr. 60. Velikost ploch pod křivkou vykazují informaci o stavu tlumiče, se vzrůstající frekvencí excitace narůstá rozdíl v hluku mezi původním stavem tlumiče a tím s poškozením. Znatelný rozdíl velikostí ploch přes všechny frekvence excitace tlumiče lze spatřit v dolní propusti 1 000 Hz. U frekvenčních pásem 65–205 Hz a 1 150–2 000 Hz dosahuje rozdíl mezi oběma stavy tlumiče při excitaci 4 Hz více než 6 dB. Pásmo 205–360 Hz může být zkresleno projevy aktuátoru Inova.

PP 65-205				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
původní	48,0	48,0	47,7	48,1
poškozen	49,7	52,7	54,7	55,6

PP 205-360				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
původní	51,0	50,4	50,2	50,3
poškozen	54,6	55,7	55,4	55,3

PP 360-1000				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
původní	52,6	51,9	52,1	52,8
poškozen	55,5	56,8	57,3	57,9

PP 1150-2000				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
původní	46,3	47,2	48,2	49,4
poškozen	48,9	52,9	55,4	57,8

DP 1000				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
původní	57,5	57,0	58,7	60,0
poškozen	63,3	63,7	64,2	64,7

**Obr. 60** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), a to pro jednotlivá pásma. Výpočty obsahů probíhají v celém intervalu zdvihu.

Využití zvukoměru společně s hlubší analýzou akustického signálu přenáší (stejně jako lokalizace) informaci o destruktivním poškození tlumiče. Poškození se zobrazuje s využitím synchronní filtrace ve formě prudkých nárůstů hluku a tento rozdíl lze kvantifikovat porovnáním vyzářených akustických energií obou stavů tlumiče.

Další série experimentů využívá jiný typ tlumiče a snahou je potvrdit výše zmíněné závěry již na běžnější formě poškození.

## 5.2 Tlumič STOS, zavzdušnění

Pro další sérii měření je využit vlakový tlumič vrtění STOS. Místo destruktivního poškození je u tlumiče vyvolána běžná forma vady – zavzdušnění. Odběrem oleje je předpokládán možný výskyt kavitace v tlumicí kapalině. Tyto experimenty slouží jako předstupeň před měřením samotného automobilového tlumiče, protože u tlumiče STOS lze díky jeho robustnější konstrukci očekávat výraznější hlukové

projevy. To může vést k lepšímu pochopení projevů výše uvedené, uměle vyvolané vady a následnému hledání diagnostického kritéria.

### 5.2.1 Lokalizace zdrojů hluku

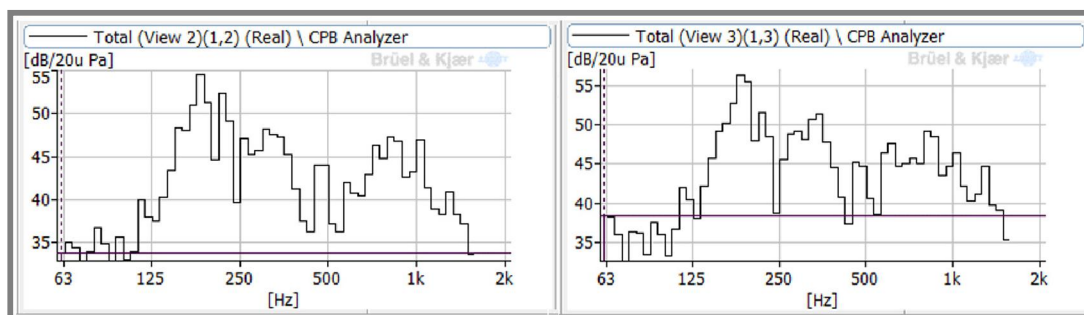
Experimenty pro lokalizaci zdrojů hluku tlumiče STOS využívají opět mikrofonní pole s metodou SONAH (viz obr. 61). Tlumič je nejprve naměřen odvzdušněný, poté v zavzdušněném stavu (odběr přibližně 30 ml oleje). Cílem měření je zjistit, zdali je zavzdušnění tlumiče lokalizovatelné a jestli má své charakteristické projevy.



**Obr. 61** Průběh měření s využitím akustické holografie a metody SONAH. Mikrofonní pole a tlumič STOS jsou zachyceny před samotným experimentem. Zaznamenání dolní úvrátě tlumiče bylo provedeno bezkontaktně laserovým senzorem.

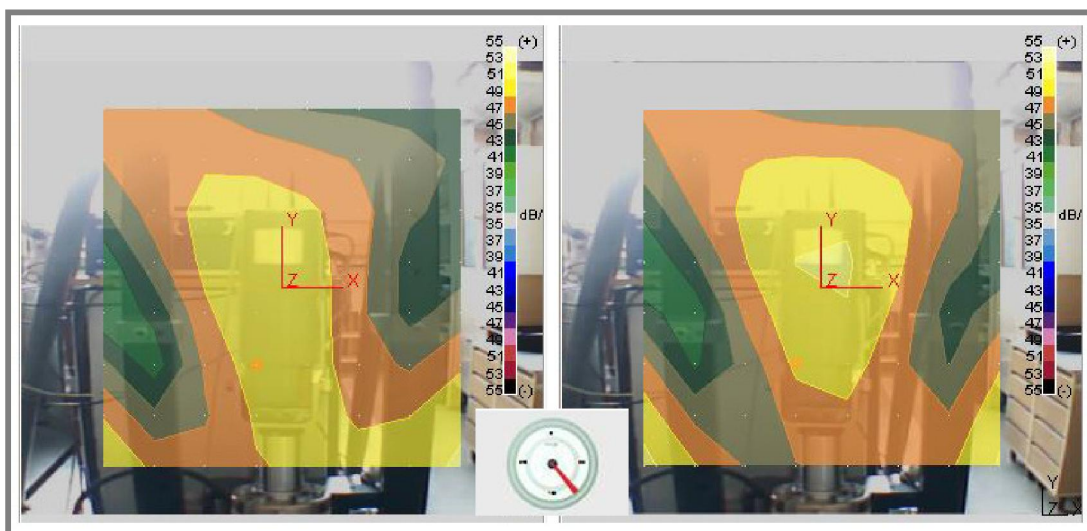
V programu PULSE jsou z naměřených dat vytvořené časové animace akustických map a akustické mapy za celý cyklus zdvihu tlumiče. Dále jsou vypočteny celkové FFT hluku pro všechny akustické měření (stav odvzdušněno/zavzdušněno, excitace tlumiče 1–3 Hz). V těchto měřeních jsou analyzovány frekvence do výše 1 500 Hz.

Z frekvenční oblasti naměřeného akustického signálu (obr. 62) je patrné, že se nejvýraznější hluk především vyskytuje v pásmu 150 až 360 Hz. Největší zastoupení mají frekvence poblíž hodnoty 200 Hz, což by mohlo představovat projev práce aktuátoru. Jelikož je v pásmu 280 až 1 000 Hz hluk zastoupen významně a periodicky se v cyklu mění, lze usuzovat, že se jedná o pásmo frekvencí, ve kterých se projevuje samotná práce tlumiče. Zavzdušněný tlumič se při vyšších frekvencích excitace projevuje intenzivněji v pásmu přibližně 580–870 Hz. Dále lze z FFT hluku konstatovat, že u obou stavů tlumiče narůstá hluk s rostoucími frekvencemi excitace.



**Obr. 62** Vlevo: frekvenční spektrum odvzdušněného stavu. Vpravo: frekvenční spektrum tlumiče se zavzdušněním. Tlumič STOS, excitace tlumiče 2 Hz.

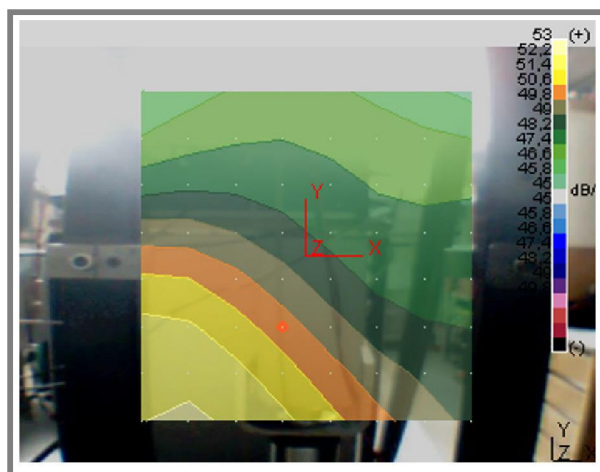
Při porovnání samotných akustických map se však ohniska ani intenzita hluku pro odvzdušněný a zavzdušněný tlumič příliš neliší. Na obr. 63 jsou si akustické mapy obou stavů velmi podobné, obdobné výsledky přináší i ostatní frekvence excitace tlumiče na všech frekvenčních pásmech. Umístění ohnisek hluku potvrzuje domněnku, že jsou akustické projevy lokalizovány především v okolí pístu. Na akustických mapách jsou také kromě hluku tlumiče patrné projevy aktuátoru Inova. Při omezení oktávového pásma na úzký interval kolem frekvence 200 Hz se vyskytují projevy aktuátoru v dolní a zároveň v levé části map (viz obr. 64).



**Obr. 63** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče STOS. Vlevo odvzdušněný, vpravo zavzdušněný stav. Frekvenční pásmo 280–1 000 Hz, excitace tlumiče 3 Hz. Ciferník představuje danou fázi zdvihu tlumiče z celého cyklu tlumení.

Experimentem je prokázáno, že je metoda akustické holografie schopna lokalizovat hlukové projevy tlumiče STOS. Metoda SONAH dokáže zobrazit významná místa akustického záření a také tyto projevy přiřadit konkrétní fázi zdvihu tlumiče. Ukazuje se ale, že akustické mapy dostatečně nepopisují stav a charakteristický projev tlumiče. Dle těchto informací nelze jednoznačně rozhodnout, zdali je tlumič v odvzdušněném či v zavzdušněném stavu. Pro diagnostické účely může být tedy oproti původnímu předpokladu využita akustická holografie jen jako doplňková metoda.





**Obr. 64** Akustická mapa při experimentu s tlumičem STOS. Frekvenční oktaóvové pásmo poblíž frekvence 200 Hz. Excitace tlumiče 1 Hz.

Proto je nutné se více zaměřit na způsob měření s podrobnější analýzou samotného akustického signálu. Vhodné je také lépe pochopit hluk samotného aktuátoru a porovnat intenzitu nežádoucího akustického pozadí vůči intenzitě hluku tlumiče.

### 5.2.2 FFT a synchronní filtrace

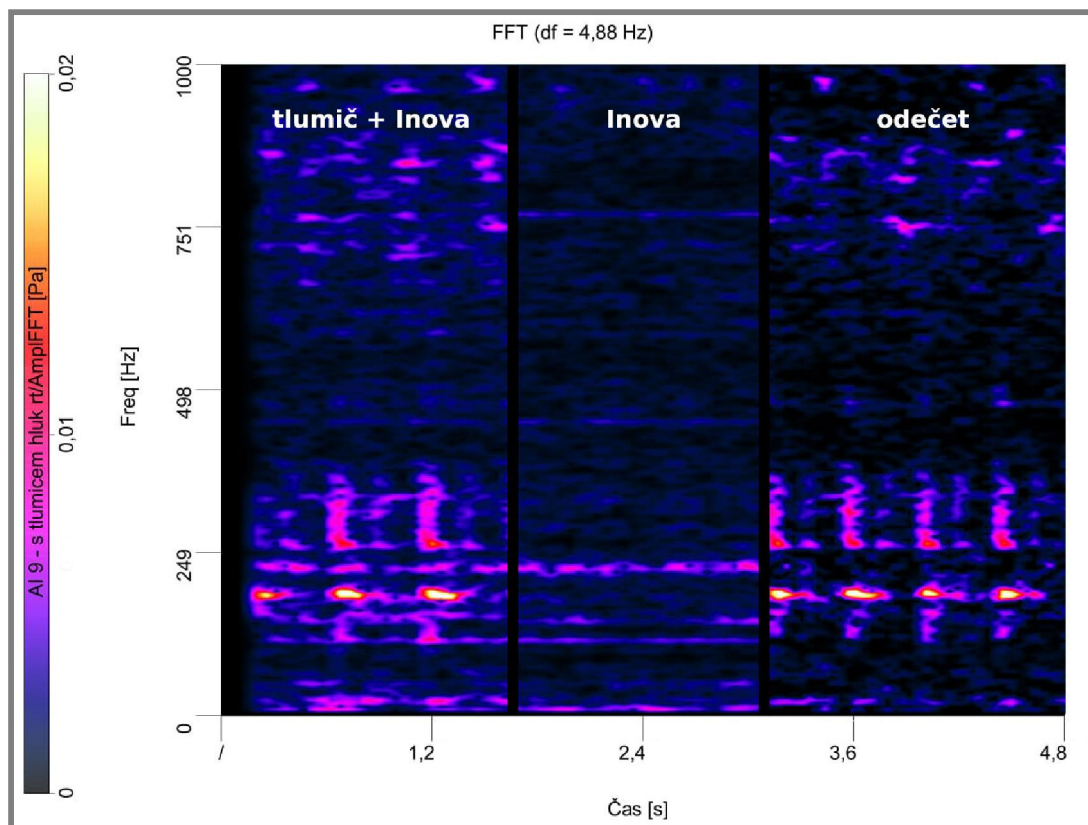
Další série experimentů měří hlukové projevy tlumiče STOS s několika stupni zavzdušnění (postupný odběr oleje), všechny stavy jsou excitovány stejným budícím signálem. Pro měření akustického záření je využit zvukoměr a následně je opět provedena analýza dat pomocí FFT a synchronní filtrace. Se znalostí měření tlumiče Ford jsou pro kvantifikaci vady využita a rozšířena další diagnostická kritéria. Nejprve jsou však provedeny experimenty pro posouzení vlivu akustického pozadí, tedy míry zkreslení hlukem od aktuátoru Inova.

#### Posouzení vlivu akustického pozadí

Výše provedené experimenty s tlumičem STOS naznačují, že jeho akustické projevy nejsou tak výrazné (jako v případě tlumiče Ford) a může docházet k možnému překryvu frekvenčních pásem aktuátoru Inova a projevů tlumiče. Proto je nutné zjistit, jakou chybu do měření vnáší hlukové pozadí. Nejprve jsou změřeny akustické projevy tlumiče při různých hodnotách excitace, poté je měřeno akustické pozadí samostatně, tedy aktuátor Inova bez tlumiče excitovaný stejnými frekvencemi. Na závěr je z těchto dat vypočteno celkové FFT společně s FFT blokové historie a proveden odečet, který je vykreslen pomocí grafu. Nastavení parametrů FFT je totožné s předcházejícími experimenty. Tlumič je v tomto experimentu zavzdušněn, což ale nijak neovlivňuje samotný odečet akustického pozadí.

Ukazuje se, že se aktuátor Inova nejvíce projevuje kolem frekvence 225 Hz (viz obr. 65, uprostřed). Další frekvencí, která byla v případě samotného aktuátoru naměřena, je 1 400 Hz. Samotný tlumič STOS se nejvýrazněji projevuje v pásmu 180 až 195 Hz, dále také v pásmu 250 až 370 Hz. Nejvyšší intenzita hluku tlumiče nastává během fáze komprese.





**Obr. 65** Graf zastoupení frekvencí v čase akustických projevů tlumiče a pulsátoru, samotného aktuátoru Inova a odečtu těchto dat.

Experiment úspěšně identifikuje intenzitu hluku akustického pozadí. Lze říci, že celková míra projevů akustického pozadí vzhledem k projevům tlumiče STOS není natolik výrazná, aby bylo nutné provádět tyto odečty pro každé měření. Obdobný experiment byl zopakován i pro tlumič Ford a data ukazují stejné závěry, tedy že není nutné provádět odečet akustického pozadí. A to i přes to, že se tlumič Ford projevuje v porovnání s tlumičem STOS méně intenzivně, což lze vysvětlit větší mohutností konstrukce vlakového tlumiče.

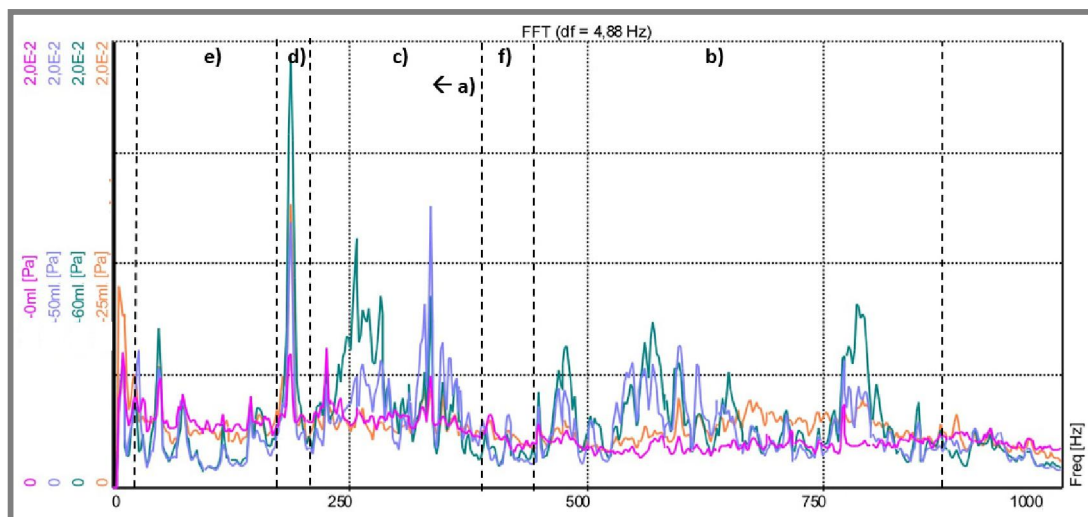
Uměle vyvolané zavzdušnění tlumiče STOS, sloužící pro hlubší analýzu a porovnání vyzařovaného hluku, je realizováno postupným odběrem tlumicí kapaliny (obr. 66). Nejprve jsou změřeny projevy tlumiče s plným objemem oleje, poté je kapalina postupně odebírána, a to o 10 ml, 25 ml, 50 ml a 60 ml z celkového objemu (přibližně 800 ml).

Postup vyhodnocování naměřených dat (včetně volby parametrů analýzy) je totožný jako v předcházejícím případě: tvorba grafů celkového FFT a FFT blokové historie společně s grafem zastoupení frekvencí v čase, definice a výpočet pásmových propustí s využitím FIR filtru a následný export dat do šablony v excelu s výpočty synchronní filtrace. Pro každé pásmo, frekvenci excitace a velikost objemu odebraného oleje je vykreslen příslušný graf průběhu hladin akustické intenzity tlumiče.



**Obr. 66** Průběh experimentů s tlumičem STOS a zvukoměrem (vlevo). Odšroubování horního víčka tlumiče a odběr přesného objemu oleje (vpravo).

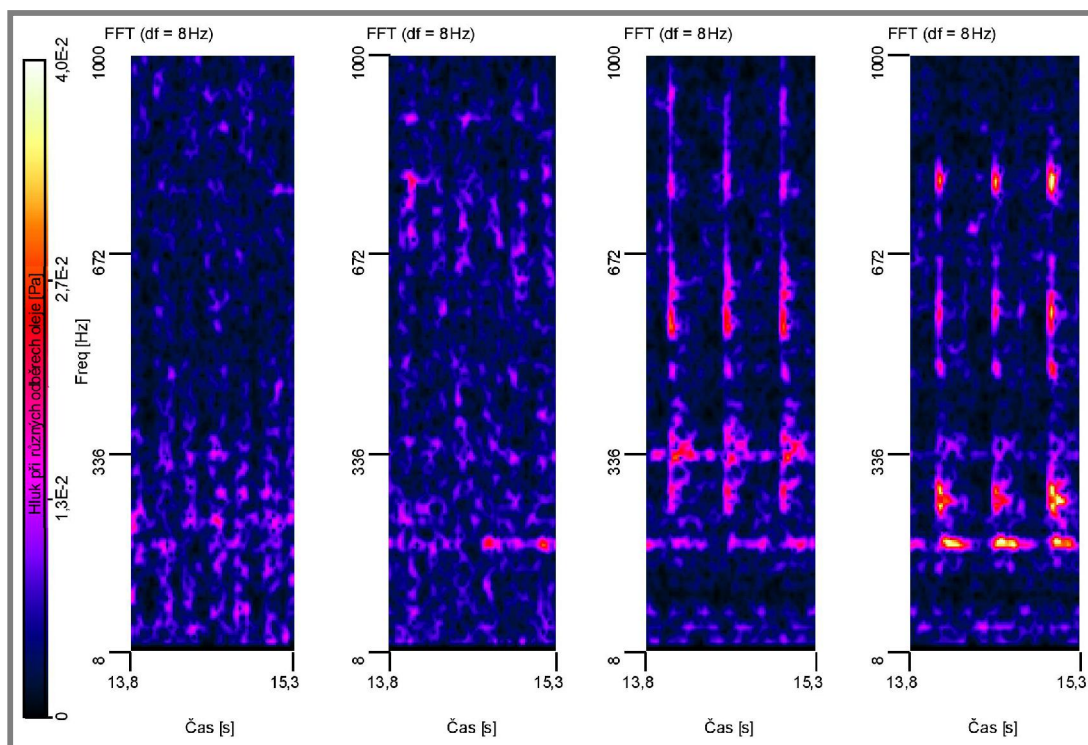
Porovnání jednotlivých frekvenčních spekter pro různě zavzdušněný tlumič je zobrazeno na obr. 67 (na obrázku chybí data pro odběr oleje 10 ml, jelikož byla křivka téměř totožná s odvzdušněným stavem). Lze konstatovat, že odvzdušněný tlumič má relativně kontinuální průběh intenzity hluku přes zobrazený úsek frekvenčního pásma. Zato čím více je tlumič zavzdušněný, tak tím více lze na spektru pozorovat určité frekvence s intenzivnějšími projevy, které u tlumiče bez závady chybí. Nejvýznamnější jsou zastoupené frekvence v pásmu 180–190 Hz, které jsou v čase stále přítomné. Může se jednat o vlastní frekvence konstrukce tlumiče. Aktuátor Inova se projevuje především na frekvenci 225 Hz, je tu stále přítomný peak pro všechna měření. Opakovaně se vyskytující peaky ve frekvenčním pásmu



**Obr. 67** FFT z celého akustického signálu tlumiče STOS s definicí jednotlivých pásem. Růžová křivka – odběr 0 ml oleje, oranžová – odběr 25 ml, modrá – odběr 50 ml, zelená odběr 60 ml. Rozsahy pásem jsou vypsány v tab. 2. Excitace tlumiče 2 Hz.

20–120 Hz jsou obtížně identifikovatelné – zřejmě se jedná o zarušení signálu a nemělo by jít o typický projev tlumiče. Přesto je ale pásmo do frekvence 170 Hz vyhodnocováno, aby mohlo být potvrzeno zjištění z rešerše, že tyto projevy nesouvisí s projevem tlumiče. Zásadní rozdíl mezi odzdušněným stavem a zavzdušněnými stavy tlumiče je patrný na pásmech přibližně 230–290 Hz a 440–860 Hz. Frekvenční spektra všech excitací se nacházejí v příloze V.

V grafech zastoupení frekvencí v čase pro různé odběry oleje (obr. 68) je jasně patrný hlukový projev ve více zavzdušněných tlumičích, který se periodicky opakuje vždy během fáze komprese před dosažením dolní úvratě. U odzdušněného tlumiče se tato pásma hlukově neprojevují. Vyšší frekvence excitace tlumiče opět vykazují výraznější akustické projevy. Grafy pro všechny hodnoty excitace tlumiče STOS jsou v příloze VI.



**Obr. 68** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič STOS. Zleva doprava: odběr 0 ml, 25 ml, 50 ml a 60 ml. Excitace tlumiče 2 Hz.

Volba frekvenčních pásem pro následný export a výpočet synchronní filtrace je patrná z obr. 67 a tab. 2. Je volena dolní propust 380 Hz, většina intenzivnějších hlukových projevů totiž spadá do tohoto frekvenčního pásma. Další volená pásma na sebe postupně navazují, od frekvence 20 až do 860 Hz. Nejvyšší pásmo 440 až 860 Hz, kde se při vyšším odběru oleje vyskytují peaky o velkých intenzitách, by mohlo představovat charakteristický projev zavzdušnění. Jelikož se objevují peaky i v desítkách Hz, nejnižší pásmo je voleno již od frekvence 20 Hz.

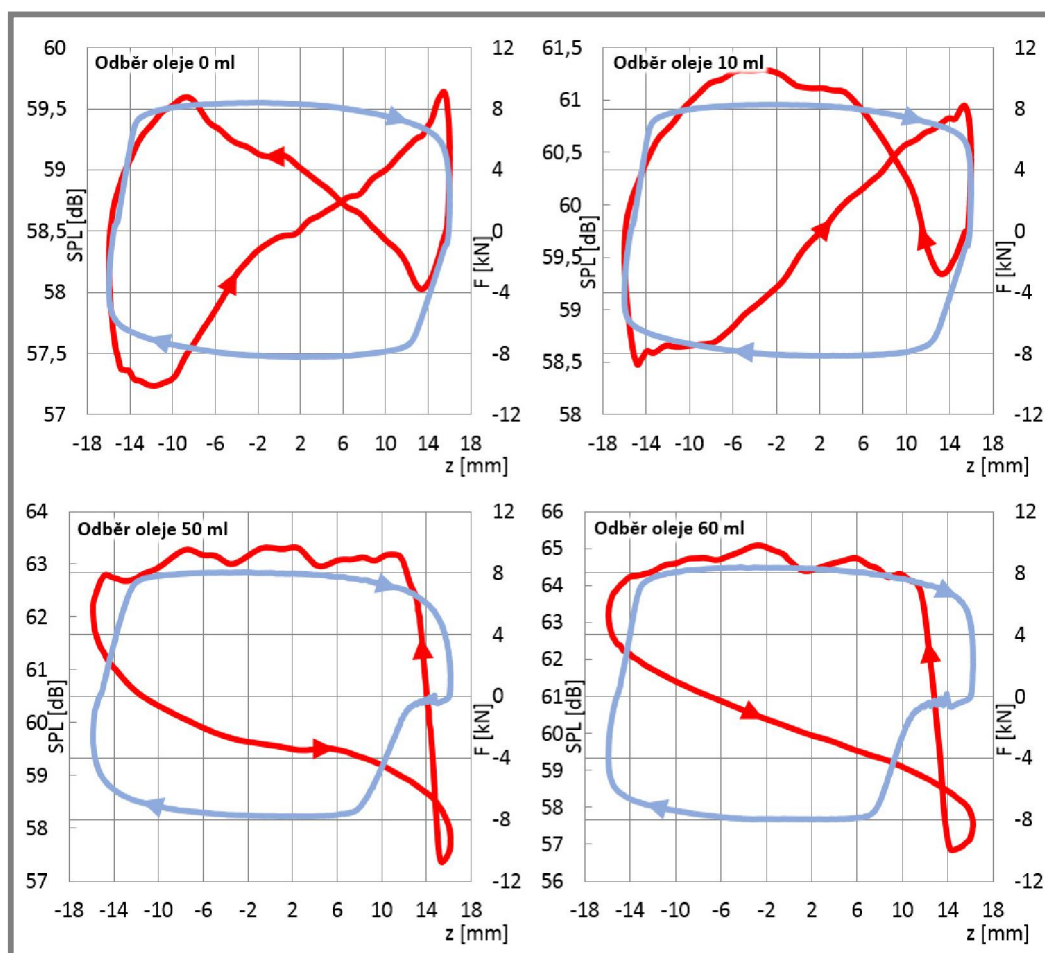
Následně jsou jednotlivá frekvenční pásma zobrazena pomocí grafů synchronních filtrací. F-z charakteristiky mají pro různý stupeň zavzdušnění očekávaný průběh, značný pokles tlumicí síly v přechodu z tahu do tlaku je znát především u odběrů oleje 50 a 60 ml (obr. 69). Výsledky naznačují, že



**Tab. 2** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič STOS.

Frekvenční pásmo	Předpoklad
a) 380 Hz dolní propust	Pásmo nejvýraznějších projevů
b) 440–860 Hz	Projev práce tlumiče
c) 205–380 Hz	Projev práce tlumiče + aktuátoru
d) 170–205 Hz	Vlastní frekvence tlumiče
e) 20–170 Hz	Vlastní frekvence aktuátoru
f) 380–440 Hz	Pásmo méně výrazného projevu

u od vzdušněného tlumiče (odběr 0 ml a 10 ml) je větší intenzita hluku ve fázi tahu, naopak u zavzdušněného tlumiče (odběr 50 ml a 60 ml) je větší intenzita hluku ve fázi tlaku. U od vzdušněného tlumiče (odběr 0 ml a 10 ml) lze pozorovat ve fázi tahu plynulý nárůst hluku a poté na začátku komprese prudký pokles. U zavzdušněného tlumiče (odběr 50 ml a 60 ml) se vyskytuje ve fázi tahu plynulé klesání hluku a poté na začátku komprese prudký nárůst, menší intenzita hluku nastává během poklesu tlumičící síly vlivem stlačování vzduchu pístem. Tyto popsané závěry jsou nejlépe patrné u frekvence excitace 2 Hz a v pásmu 205–380 Hz a také



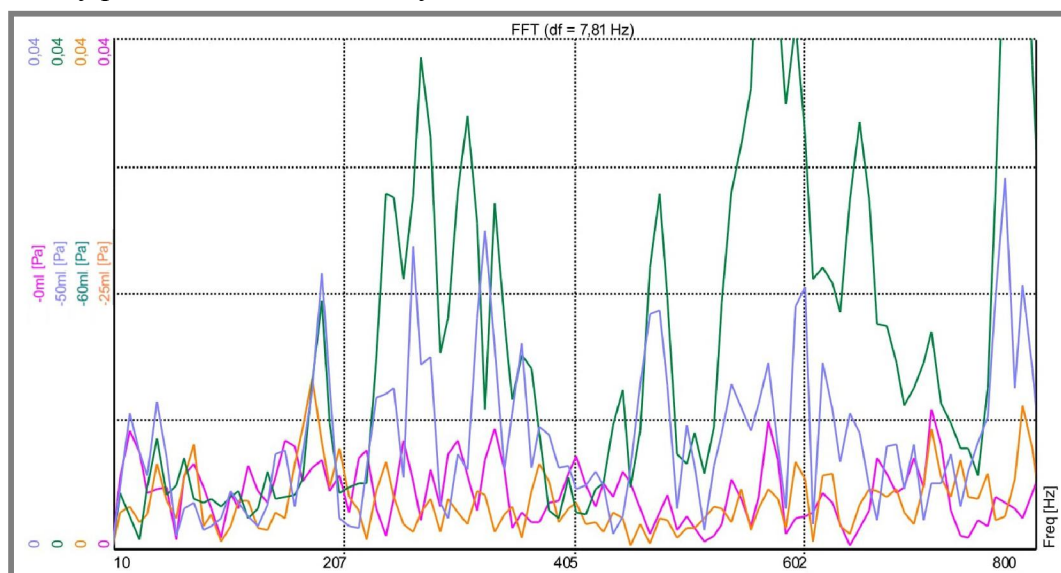
**Obr. 69** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) pro různou velikost odebraného objemu oleje v tlumiči STOS. Excitace 2 Hz, pásmo 205–380 Hz.

v dolní propusti do 380 Hz. Porovnájí-li se velikosti hladin akustických intenzit jednotlivých zavzdušnění ve všech frekvenčních pásmech, tak se zdají nahodilé a bez náznaku jakéhokoliv pravidla. V příloze VII jsou grafy synchronních filtrací pro pásma dolní propust 380 Hz, 205–380 Hz a 440–860 Hz, a to pro všechny frekvence excitace.

#### Stanovení diagnostického kritéria

Následující snahou je nalezení diagnostického kritéria kvantifikujícího výše popsané rozdíly.

Jako kritérium je opět využit výpočet pomocí integrace křivky hluku, tedy porovnávají se obsahy ploch pod křivkou akustických tlaků (ilustrace viz obr. 72). Jak již bylo zjištěno, zásadní rozdíly vyzářeného hluku u jednotlivých odběrů oleje jsou pozorovány především ve frekvenčních pásmech 205–380 Hz, 440–860 Hz a také v dolní propusti 380 Hz. (viz obr. 70). Projevy výše zmíněných pásem byly sledovány vzhledem k aktuálnímu zdvihu tlumiče, jelikož k nárůstu určitých frekvencí docházelo pouze v konkrétní fázi cyklu tlumení. Za pomoci FFT blokové historie byly zjištěny intervaly zdvihu s nejintenzivnějšími hlukovými projevy, což dále vede k upřesnění integračního kritéria. Kromě voleného intervalu celé fáze cyklu tlumení byl uvažován také interval fáze tahu (hlavní peaky se nacházely ve zdvihu od -12 mm do 12 mm, především u 2 Hz a 3 Hz). Další upřesňující interval byl volen na zdvihu -12 mm až 0 mm, kde byla velikost peaků nejvýraznější. V případě excitace 1 Hz se peaky vyskytovaly především v intervalu -16 mm až -10 mm, tedy počátku fáze tahu – čtvrtý interval.



**Obr. 70** FFT blokové historie akustického signálu tlumiče STOS pro jednotlivé velikosti odběru oleje. Růžová křivka – odběr 0 ml oleje, oranžová – odběr 25 ml, modrá – odběr 50 ml, zelená odběr 60 ml. Excitace 2 Hz, počátek fáze tahu. Jasně patrný vyšší hluk u více zavzdušněného tlumiče.

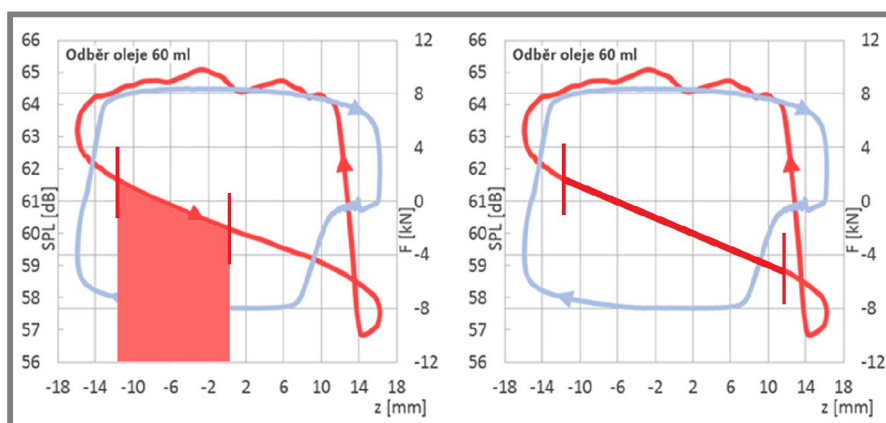
Z porovnání velikostí ploch pod křivkami hluku míra zavzdušnění tlumiče zřejmě přímo nevyplývá (viz obr. 71). Průběhy hodnot (pokles či nárůst velikosti ploch) pro excitaci 1 Hz vycházejí naopak než pro 2 Hz či 3 Hz. Z FFT blokové historie jsou patrné jasné nárůsty hluku u křivek odběru 50 ml a odběru 60 ml ve výše zmíněných frekvenčních pásmech, avšak při nižší frekvenci excitace se tlumič projevuje tišeji. Celkově lze říci, že rozdíly mezi jednotlivými tabulkovými

hodnotami nejsou příliš velké. Tabulky pro frekvenční pásma 440–860 Hz, 205–380 Hz a dolní propust 380 Hz pro všechny čtyři intervaly ze zdvihu se nacházejí v příloze VIII.

DP 380				PP 440-860				PP 205-380			
zdvih od -12 mm do 0 mm				zdvih od -12 mm do 0 mm				zdvih od -12 mm do 0 mm			
	1 Hz	2 Hz	3 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz
"-0 ml"	7,62	7,60	8,09	"-0 ml"	6,73	6,74	7,41	"-0 ml"	6,58	6,71	7,41
"-10 ml"	7,74	7,76	8,23	"-10 ml"	6,61	6,80	7,49	"-10 ml"	6,64	6,83	7,71
"-25 ml"	7,66	7,71	8,14	"-25 ml"	6,89	7,04	7,65	"-25 ml"	6,50	6,81	7,57
"-50 ml"	7,60	7,70	8,07	"-50 ml"	6,43	6,92	7,91	"-50 ml"	6,29	6,96	7,65
"-60 ml"	7,59	7,78	8,27	"-60 ml"	6,38	7,08	7,62	"-60 ml"	6,26	7,07	7,69

**Obr. 71** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), a to pro jednotlivá pásma. Výpočty obsahů probíhají ze zdvihu od -12 mm do 0 mm, tedy z části fáze tahu.

Druhý způsob pro kvantifikaci rozdílů projevů tlumiče pracuje s poklesy a nárůsty hluku, které jsou jasně patrné z grafů synchronní filtrace. Jsou porovnávány směrnice lineární regrese křivky na určitých intervalech zdvihu (ilustrace viz obr. 72). Čili určitý rozsah dat hladin akustické intenzity je proložen přímkou a dále je vypočten úhel sklonu vůči ose x. Tyto výpočty jsou provedeny pro všechna pásma, frekvence excitace a velikosti odběru oleje. Rozsahy dat zdvihu pro prokládání přímkou jsou voleny dle míry sklonu křivky hluku – ta část zdvihu, kde jsou v grafech synchronní filtrace nejviditelnější rozdíly mezi odvzdušněným stavem a zavzdušněnými stavy. Jedná se o intervaly: zdvih od 16 mm do 0 mm (fáze od počátku komprese), zdvih od 10 mm do 10 mm (fáze přechodu z tahu do komprese), zdvih od 16 mm do -16 mm (celá fáze komprese), zdvih od 12 mm do 12 mm (fáze přechodu z tahu do komprese – přesnější) a zdvih od -12 mm do 12 mm (střední část fáze tahu).



**Obr. 72** Ilustrace funkce diagnostických kritérií – vlevo integrační kritérium porovnávající obsahy ploch pod křivkou, vpravo kritérium lineární regrese porovnávající sklon přímky vůči ose x.

Na velkém množství tabulek (viz příloha IX) vychází hodnoty sklonu regrese v opačném sledu u excitace 1 Hz než u excitací 2 a 3 Hz. Postupný pokles hodnot sklonů lze nalézt především v pásmech 205–380 Hz, 380–440 Hz a také v dolní propusti 380 Hz. Z hlediska uvažovaných intervalů zdvihu lze stejné výsledky u všech frekvencí excitace spatřit na intervalu od 12 mm do 12 mm (fáze přechodu z tahu do komprese). Nejprůkaznější výsledky se ale nachází v intervalu -12 mm

až 12 mm (fáze tahu), sklony přímek zde vykazují výraznou klesající tendenci opět u všech frekvencí excitace tlumiče (viz obr. 73).

DP 380      zdvih od -12 mm do 12 mm				PP 205-380      zdvih od -12 mm do 12 mm				PP 380-440      zdvih od -12 mm do 12 mm			
	1 Hz	2 Hz	3 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz
"-0 ml"	4,5	2,9	0,9	"-0 ml"	14,8	4,6	-0,4	"-0 ml"	18,9	6,1	1,7
"-10 ml"	4,4	3,1	2,5	"-10 ml"	11,0	5,6	2,4	"-10 ml"	8,6	5,3	3,7
"-25 ml"	2,8	1,8	1,0	"-25 ml"	4,6	1,1	-0,3	"-25 ml"	9,1	2,6	4,0
"-50 ml"	0,9	0,1	-1,6	"-50 ml"	1,1	-3,0	-4,3	"-50 ml"	-1,6	-5,1	-4,6
"-60 ml"	1,1	-2,0	-0,6	"-60 ml"	-1,2	-6,6	-4,1	"-60 ml"	-1,5	-3,8	-3,6

**Obr. 73** Tabulky představují hodnoty sklonu lineárních regresí z hluku, a to pro jednotlivá pásma. Výpočet regrese probíhá od zdvihu -12 mm do 12 mm, tedy téměř z celé fáze tahu. Hodnoty sklonu jsou ve stupních vzhledem k ose x.

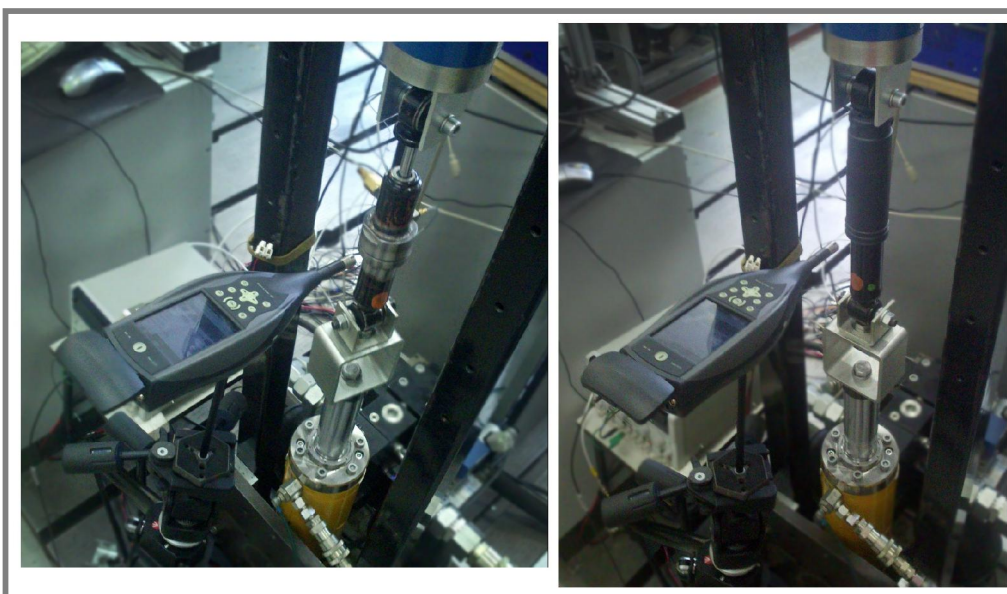
Experimenty naznačují možnost identifikovat a kvantifikovat rozdíly v případech rozdílného rozsahu zavzdušnění tlumiče STOS z akustického projevu tlumiče. Zavzdušněný tlumič se oproti tomu odvzdušněnému projevuje na určitých pásmech intenzivněji, tyto rozdíly jsou patrné při porovnání frekvenčních spekter hluků. Vykreslené průběhy hluků s využitím synchronní filtrace vykazují v případě zavzdušnění pokles hluku na počátku komprese, což lze dále kvantifikovat proložením křivek hluku lineární regresí na určité fázi zdvihu.

Následující snahou je tyto poznatky aplikovat i pro tlumiče Fiat a stanovit pro něj vhodné diagnostické kritérium popisující stav zavzdušnění.

### 5.3 Tlumič Fiat, zavzdušnění

Pro další sérii experimentů je využit již představitel automobilového typu tlumiče. Testovaný tlumič Fiat je dostupný ve dvou konfiguracích – originální verze je měřena jako ideální stav, v adaptivní verzi je postupným odběrem oleje vyvoláváno zavzdušnění. S využitím znalostí projevů tlumiče STOS je pro tento automobilový tlumič následně hledáno diagnostické kritérium.

5.3



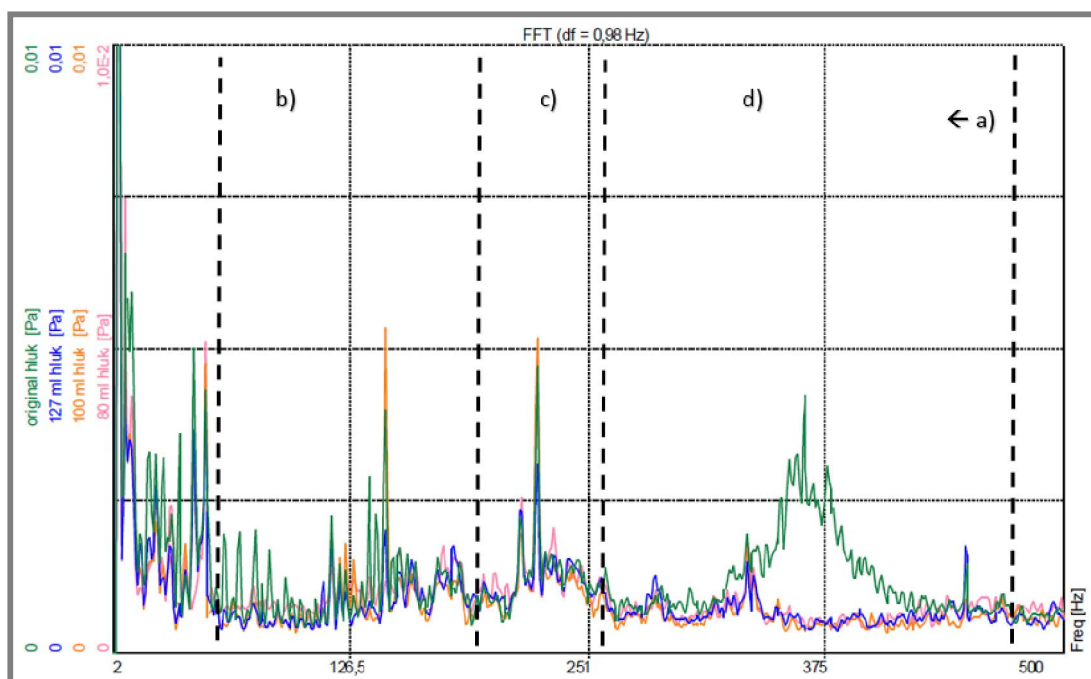
**Obr. 74** Průběh experimentů se zvukoměrem a tlumičem Fiat. Vlevo adaptivní verze tlumiče, vpravo pak originální verze.



### 5.3.1 FFT a synchronní filtrace

Na adaptivní verzi tlumiče Ford je uměle vyvoláno zavzdušnění, nejprve je tlumič napuštěn 80 ml tlumicí kapalinou (představuje odběr přibližně 45 ml z celkového množství), potom 100 ml (odběr přibližně 25 ml) a následné množství přibližně 127 ml oleje představuje plný stav kapaliny. Všechny stavy, včetně tlumiče Fiat originál, jsou měřeny za totožných podmínek. Pro měření hluku je opět využit zvukoměr (obr. 74) a následně je proveden výpočet FFT a synchronní filtrace. Na závěr je definováno diagnostické kritérium popisující vadu zavzdušnění.

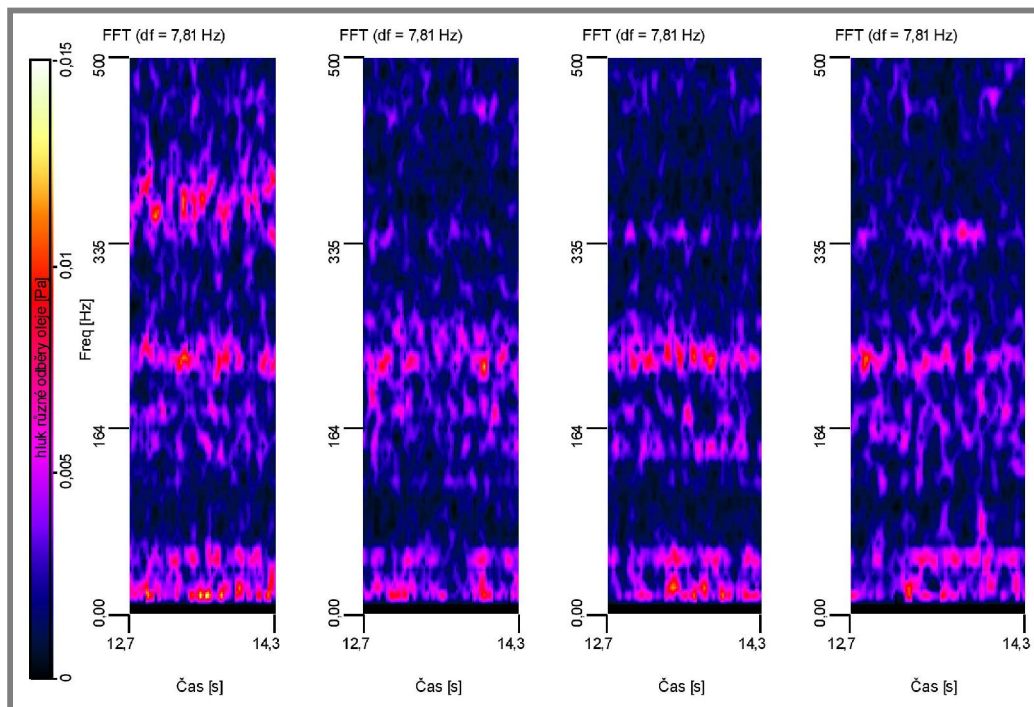
Obecně lze říci, že je intenzita hlukových projevů tlumiče Fiat výrazně menší v porovnání s tlumičem STOS. Z celkového průběhu frekvenčního pásma lze soudit, že se ve všech excitacích jednotlivé FFT pro různé stavy tlumiče téměř překrývají (viz obr. 75). Výjimku představuje verze tlumiče originál, která se výrazněji projevuje v pásmu zhruba 340–440 Hz ve všech excitacích. Se vzrůstající frekvencí excitace na tomto pásmu projevy narůstají. Dalším rozdílem je (v případě excitace 4 Hz) na nižších frekvencích hluku tlumiče originál větší množství peaků, které se vyskytují pravidelně a jejich intenzita klesá. Další pozorovaná změna je na adaptivní verzi tlumiče s množstvím oleje 127 ml – při excitaci 1 Hz se ve spektru nachází dva výrazné peaky, přibližně 23 a 67 Hz. Tyto projevy by mohly představovat vlastní frekvenci aktuátoru a její harmonický násobek. V pásmu přibližně 500–1000 Hz se vyskytují málo intenzivní akustické projevy. Zdá se, že jsou si frekvence na tomto pásmu pro všechny stavy tlumiče svým průběhem velmi podobné. Čili by nemělo jít o charakteristické projevy tlumiče, proto nebyly vyšší frekvence od 500 Hz dále uvažovány. Aktuátor by se měl dle předchozích měření projevovat především kolem frekvence 225 Hz. Opravdu je tu stále přítomný peak, celkově se jedná o jeden z nejintenzivnějších projevů. Frekvenční spektra pro všechny frekvence excitace jsou v příloze X.



Obr. 75 Frekvenční spektrum hluku obou verzí tlumiče Fiat. Růžová – adaptivní, 80 ml oleje; oranžová – adaptivní, 100 ml; modrá – adaptivní, 127 ml a zelená – originál. Excitace 4 Hz.



U grafů zastoupení frekvencí v čase je opět patrné, že se nejvíce odlišuje tlumič originální verze. Především ve vyšších excitacích v pásmu přibližně 300–440 Hz (viz obr. 76). Zdá se, že jsou tyto projevy vzhledem k fázi zdvihu nahodilé, avšak stále přítomné. Frekvence v tomto pásmu se u ostatních měření s adaptivním tlumičem výrazně neprojevují. Grafy pro všechny excitace a odběry oleje jsou k nahlédnutí v příloze XI.



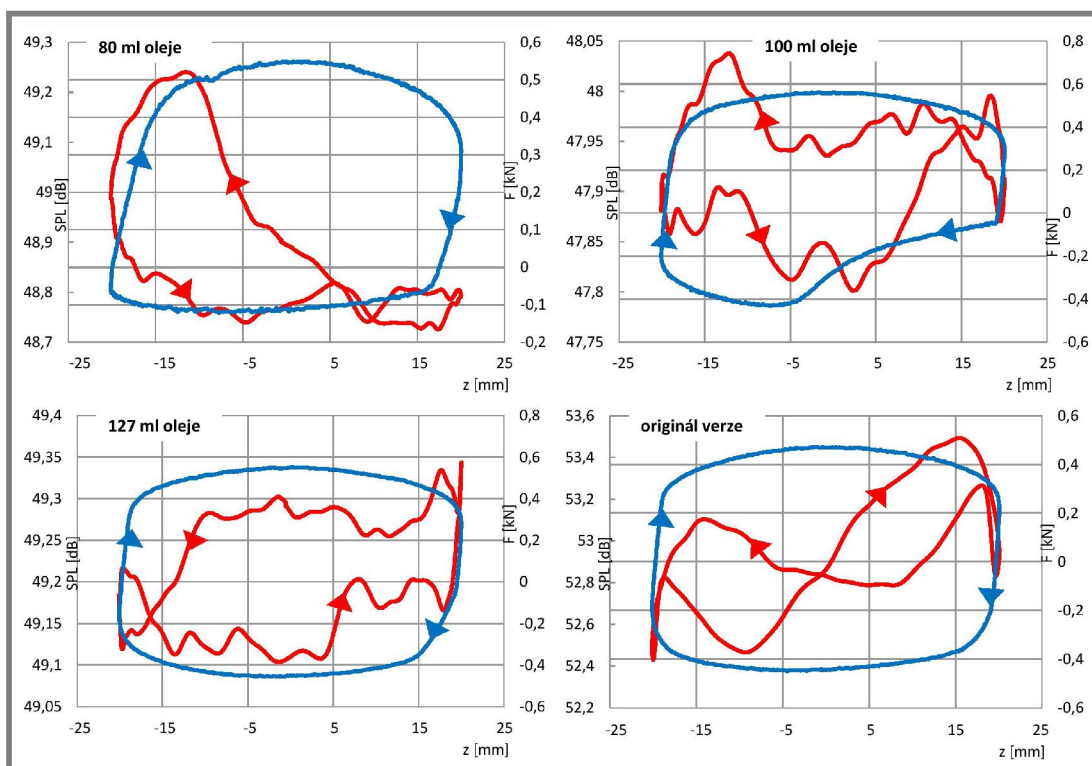
**Obr. 76** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič Fiat. Zleva doprava: originální verze, 80 ml oleje, 100 ml a 127 ml. Excitace tlumiče 3 Hz.

Z grafů celkových FFT bylo poměrně obtížné jednoznačně stanovit hranice jednotlivých frekvenčních pásem, které slouží pro export a výpočet synchronní filtrace. Rozdělení pásem je naznačeno a popsáno na obr. 75 a tab. 3. Jako hraniční byla stanovena frekvence 470 Hz, nad touto hodnotou se tlumič nikterak výrazně neprojevoval. Mezní spodní frekvencí je hodnota 60 Hz, protože v nižších frekvencích se vyskytuje především peak kolem 50 Hz (možné rušení od elektrické sítě) a jiné, zřejmě harmonické frekvence, u kterých se nepředpokládá, že by mohly popisovat stav tlumiče. Také je voleno pásmo 195–255 Hz, což by mohly být hlukové projevy aktuátoru (odpovídá  $225 \text{ Hz} \pm 30 \text{ Hz}$ ). Další pásma jsou tedy 60–195 Hz a 255–470 Hz.

**Tab. 3** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič Fiat.

Frekvenční pásmo		Předpoklad
a)	470 Hz dolní propust	Pásmo nejvýraznějších projevů
b)	60–195 Hz	Vlastní frekvence tlumiče
c)	195–255 Hz	Projev práce pulsátoru
d)	255–470 Hz	Projev práce tlumiče

Na obr. 77 jsou grafy ze synchronní filtrace všech stavů tlumiče pro excitaci 3 Hz. V F-z grafech tlumiče s různými odběry oleje je očekávaný rozdíl. Tlumič s objemem oleje 80 ml ve fázi tlaku vykazuje velmi malou tlumicí tlačnou sílu, zato v tahu jsou velikosti síly srovnatelné s ostatními stavy tlumiče. Zdá se, že tlumič ve fázi komprese stlačuje pouze vzduch. Stav se 100 ml oleje již vykazuje očekávané „vykousnutí“ na počátku fáze komprese (stejně jako u tlumiče STOS). F-z grafy by u stavu 127 ml a tlumiče originál měly být teoreticky stejné, avšak rozdílem je jednak nižší tlumicí síla v tahu u tlumiče originál, dále pak vykazuje F-z charakteristika tlumiče originál větší zaoblení v přechodu z tahu do tlaku – tlumič originál je zřejmě lépe odvzdušněn než tlumič adaptivní se 127 ml oleje.



**Obr. 77** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) pro různé stavy obou typů tlumiče Fiat. Excitace 3 Hz, frekvenční pásmo 255–470 Hz.

U tlumiče STOS se dala naleznout souvislost mezi mírou zavzdušnění a průběhem křivky hluku synchronní filtrace vzhledem k fázi zdvihu tlumiče. U tlumiče Fiat ale nelze z tvarů křivek udělat podobný závěr, který by takto napovídal o míře zavzdušnění. Stejně tak nelze konstatovat, u jaké excitace a v jakém pásmu jsou nejlépe vidět rozdíly mezi jednotlivými křivkami hluku různých stavů tlumiče. Grafy frekvenčních pásem dolní propusti 470 Hz a pásma 255–470 Hz se všemi stavy tlumiče Fiat se nacházejí v příloze XII.

#### Stanovení diagnostického kritéria

Pro výběr diagnostického kritéria detekující zavzdušnění byl aplikován stejný postup jako v případě tlumiče STOS.

Nejprve bylo aplikováno kritérium popisující sklony lineární spojnice hluku vzhledem k ose x. Jelikož je z průběhů křivek hluku velmi obtížné vybrat specifické

intervalu zdvihu, kde by byly hlukové projevy různých stavů očividně rozdílné, tak intervaly pro výpočet sklonů zůstaly stejné jako u tlumiče STOS. Postupný nárůst sklonu přímky regrese lze vidět v pásmu 255 až 470 Hz, a to v intervalech zdvihu od 20 mm do 0 mm, tedy fáze z první poloviny komprese a od zdvihu 20 mm do -20 mm, tedy celé fáze komprese (obr. 78). Rozdíly mezi intenzitou zavzdušnění jsou zde patrné přes všechny frekvence excitace. Postupný nárůst hodnot sklonů pro různou míru zavzdušnění se nachází především na excitacích 1 Hz a 2 Hz. Dle tohoto kritéria se opět ukazuje, že je tlumič originál lépe odzdušněn a seřízen než adaptivní verze tlumiče s plným objemem tlumicí kapaliny. Zatímco u tlumiče STOS byly výsledky nejprůkaznější v případě fáze tahu, u tlumiče Fiat se zavzdušnění projevuje naopak ve fázi tlaku tlumicího cyklu. Tabulky frekvenčních pásem z vybraných intervalů zdvihu jsou k vidění v příloze XIII.

PP 255-470      zdvih od 20 mm do 0 mm					PP 255-470      zdvih od 20 mm do -20 mm				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
"80 ml"	-2,3	-1,0	-0,3	-0,4	"80 ml"	-0,3	-0,4	-0,7	-0,2
"100 ml"	1,1	-0,1	-0,2	0,3	"100 ml"	1,1	-0,2	-0,1	0,2
"127 ml"	1,9	0,5	0,1	-0,3	"127 ml"	1,6	1,2	0,2	0,4
"original"	3,3	1,3	0,9	1,0	"original"	3,1	1,7	0,2	0,3

**Obr. 78** Tabulky představují hodnoty sklonu lineárních regresí z hluku, a to pro frekvenční pásmo 255–470 Hz. Výpočet regrese probíhá od zdvihu 20 mm do 0 mm (vlevo) a od zdvihu 20 mm do -20 mm (vpravo). Hodnoty sklonu jsou ve stupních vzhledem k ose x.

Pro výpočet vyzářených akustických energií zůstaly intervaly stejné jako v předchozím případě diagnostiky tlumiče STOS. Obecně lze postupné nárůsty hodnot odpovídající stavu tlumiče nalézt především v pásmech 255–470 Hz a dolní propusti 470 Hz. Naopak pásma 60–195 Hz a 195–255 Hz nenesou žádné vypovídající informace o míře zavzdušnění. Frekvence excitace tlumiče 1 a 2 Hz vykazuje s rostoucí mírou zavzdušnění náznak postupného poklesu akustických energií, u excitací 3 a 4 Hz se výrazněji liší pouze verze tlumiče originál (viz obr. 79). Celkově nejsou rozdíly mezi jednotlivými hodnotami akustických energií příliš velké. Z tohoto důvodu jsou rozdíly nejvýznamnější u intervalu celého zdvihu, nikoli u intervalů beroucí v potaz pouze malou část zdvihu. V případě tlumiče STOS se u tohoto kritéria zdály výsledky nahodilé, u tlumiče Fiat existuje potenciál integrační kritérium využít ke stanovení správně fungujícího tlumiče, avšak definovat z dat míru zavzdušnění je složitější. Tabulky pro všechna frekvenční pásma a vybrané intervaly zdvihu se nachází v příloze XIV.

PP 255-470      celý zdvih					PP 255-470      zdvih od -15 mm do 15 mm				
	1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz		1 Hz	2 Hz	3 Hz	4 Hz
"80 ml"	48,0	48,4	48,9	49,5	"80 ml"	11,8	11,6	11,9	12,2
"100 ml"	47,6	47,6	47,9	48,2	"100 ml"	11,8	11,5	11,6	11,9
"127 ml"	49,2	49,7	49,2	49,3	"127 ml"	12,1	11,9	11,9	12,1
"original"	50,0	50,9	53,0	55,7	"original"	12,4	12,3	12,9	13,6

**Obr. 79** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou) tlumiče Fiat, a to pro frekvenční pásmo 255 až 470 Hz. Výpočet obsahů probíhá v celém intervalu zdvihu (vlevo) a v intervalu -15 až 15 mm, tedy v téměř celé fázi tahu (vpravo).

Experimenty s automobilovým tlumičem Fiat také ukazují potenciál identifikace stavu zavzdušnění z analýzy vyzářeného hluku tlumiče. I přesto,

že z průběhů hluku synchronní filtrace není pouhým okem patrná žádná souvislost mezi tvarem křivek a zavzdušněním, tak lze tyto rozdíly na konkrétním frekvenčním pásmu vyčíslit především regresním kritériem, ale z části také kritériem integračním.

Všechna digitální data z uvedených měření jsou k dispozici na přiloženém DVD, které je součástí diplomové práce jako příloha XV.

## 6 DISKUZE

## 6

Diplomová práce je postavena na prvotní hypotéze, že vadný tlumič mění své akustické projevy, každá závada má svůj charakteristický projev a pomocí analýzy hluku může být vada následně identifikována. Předpoklad, že pro měření a diagnostiku budou především využita data z lokalizace zdrojů hluku se ukázal jako lichý. Zvolená vada ve formě zavzdušnění může být identifikována detailnější analýzou akustického signálu.

Zřejmě nejpodstatnějším zjištěním celé práce je, že daná závada (zavzdušnění) obecně nemá svůj charakteristický způsob projevu v porovnání se standardním projevem tlumiče. Typický projev vady totiž ovlivňuje typ konstrukce tlumiče a závada se může u jiného tlumiče projevit odlišně – na určitém frekvenčním pásmu, při specifických frekvencích excitace či při určité fázi zdvihu. Diplomová práce tedy přináší možná diagnostická kritéria pouze pro konkrétní, zde experimentálně otestované tlumiče a následně je na základě těchto měření definována obecná diagnostická metodika. Navrhovanou metodikou (která je popsána v podkapitole 6.3) tedy nelze popsat typický projev konkrétní závady pro jakýkoliv tlumič, jelikož je třeba ke každému tlumiči přistupovat individuálně.

### 6.1 Analýza experimentů

### 6.1

Uměle vyvolané poškození tlumiče Ford bylo poměrně radikální. Vypuštěním veškerého oleje se výrazně pozměnil průběh tlumicí síly – pohybu pístu ve vnitřním plášti kladl odpor pouze vzduch. Otvor byl vyvrtán do vnějšího i vnitřního pláště pro snadné odpuštění tlumicí kapaliny. Původní předpoklad byl, že hluk bude způsobován třením díky pohybu pístu po stěnách pláště „nasucho“. Nicméně zbylé množství oleje v tlumiči třecím projevům zabránilo. Výrazný naměřený hlukový projev poškozeného stavu byl nakonec zapříčiněn vyvrtaným otvorem, a to i přesto, že byl otvor na vnějším plášti utěsněn. Hluk mohl být způsoben průtokem vzduchu přes otvor (kvůli vyrovnání tlaku před a za pístem), a především také přechodem gumového těsnicího kroužku pístu přes nerovnost na plášti. Výrazný akustický projev byl naměřen vždy dvakrát za tlumicí cyklus, jelikož píst přes otvor přešel při pohybu nahoru i dolů.

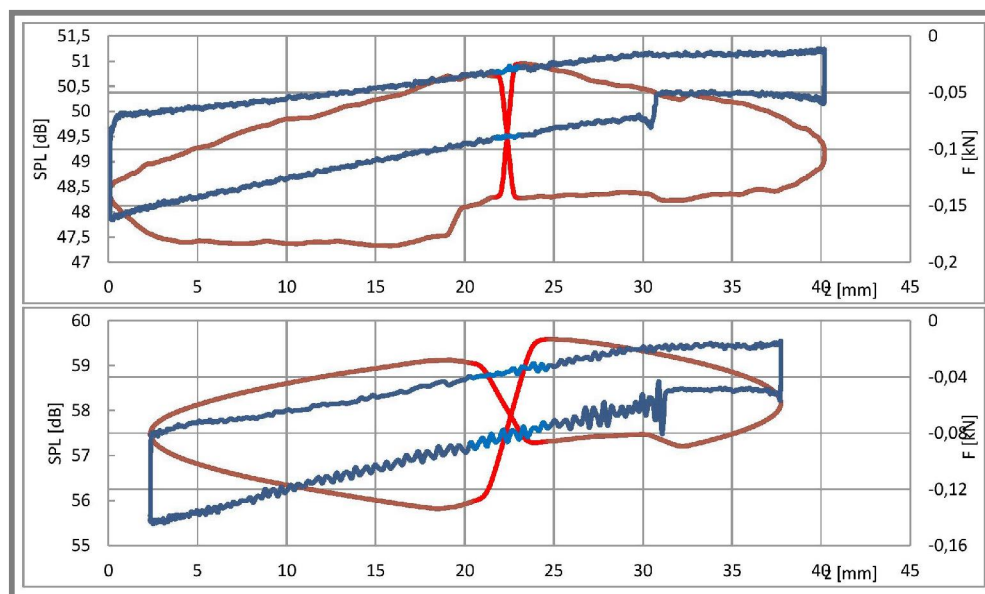
Metoda lokalizace zdrojů hluku dokázala úspěšně identifikovat ohnisko projevu, které svou polohou odpovídá poloze vyvrtané díry na plášti. Oba intenzivní hlukové projevy, pozorované v jednom cyklu, dělí doba právě poloviny cyklu. To značí, že střední poloha pístu byla nastavena přímo v úrovni otvoru. V experimentech s lokalizací se závada v případě excitace 1 Hz (oproti vyšším frekvencím excitace tlumiče) téměř neprojevuje, ačkoliv v grafech synchronní filtrace je „klepnutí“ zřetelné u všech frekvencí excitace. Za tento fakt by mohla citlivost lokalizace, jelikož intenzita projevu vady není v případě excitace 1 Hz o moc výraznější oproti samotnému hluku tlumiče v původním stavu.

S lokalizací se úspěšně povedlo odlišit projevy původního a poškozeného stavu tlumiče Ford. V případě akustické mapy vykreslené za celý cyklus tlumení pro pásmo 1–1,5 kHz dosahují rozdíly mezi oběma stavy až 16 dB (51 dB původní, 67 dB poškozený tlumič). V případě časově proměnné akustické mapy v okamžiku projevu „klepnutí“ vykazuje hluk na stejném frekvenčním pásmu rozdíl až 22 dB (52 dB původní, 74 dB poškozený tlumič). Definované akustické kritérium, které



porovnává emitovanou akustickou energii za celý cyklus zdvihu, je schopno vyčíslit rozdíl mezi oběma stavy tlumiče. V pásmu dolní propusti 1 kHz dosahuje rozdíl vyzářeného hluku obou stavů tlumiče průměrně 5 %, v pásmu 1 150 až 2 000 Hz je průměrný rozdíl 6%.

V grafech synchronní filtrace ve frekvenčním pásmu 1 150 až 2 000 Hz strmost pozorovaného nárůstu hluku s rostoucí frekvencí excitace klesá (obr. 80). Tento fakt je zapříčiněn dobou trvání jednoho cyklu. Zatímco při excitaci 1 Hz trvá cyklus logicky 1 s, při excitaci 4 Hz pak 0,25 s. Doba „náběhu“ hluku je však v obou případech stejná, přibližně 0,013 s. Jedná se tedy pouze o zkreslení vlivem rozdílných časů trvání cyklu.



**Obr. 80** Rozdílná strmost náběhu hluku v grafech synchronní filtrace tlumiče Ford s poškozením, frekvenční pásmo 1 150 až 2 000 Hz, excitace 1 Hz (nahore) a 4 Hz (dole).

Poškození tlumiče Ford bylo natolik zásadní, že projev „klepnutí“ u poškozeného stavu byl slyšitelný při pozorném poslechu pouhým uchem. Avšak to nepředstavuje takový problém, protože měření s tímto typem závady sloužilo pouze k odladění parametrů experimentů a odzkoušení optimálních cest pro analýzu naměřených dat před experimenty se zavzdušněním.

Konstrukce tlumiče STOS je v porovnání s automobilovými tlumiči mohutná a byl potvrzen předpoklad, že akustické projevy tohoto tlumiče budou výrazné. To vedlo k lepšímu pochopení změn hluku během zavzdušnění tlumiče a následné vhodné volbě diagnostického kritéria.

Experimenty s metodou pro lokalizaci zdrojů hluku nedokázaly nijak výrazně odlišit zavzdušněný a odvzdušněný stav tlumiče. Ačkoliv je z následné detailnější analýzy frekvenčních spekter zřejmý rozdíl mezi oběma stavy, mikrofonní pole a metoda SONAH nemají zřejmě dostatečnou citlivost, aby dokázaly zobrazit tyto relativně mírné rozdíly na vykreslených akustických mapách. Takovéto zjištění ukázalo, že je potenciál metody lokalizace pouze při výraznějších vadách. V případě i slyšitelné závady může metoda určit ohnisko akustického záření a přiřadit

ho konkrétní fázi cyklu. Proto nemusí být lokalizace jako taková plně zavržena a může sloužit jako diagnostický doplněk k detailnější analýze akustického signálu.

Průběhy F-z charakteristik jednotlivých fází zavzdušnění dokázaly názorně zobrazit propady v tlumicí síle. Na počátku kompresní fáze je v případě odběru oleje patrný pokles síly, kdy pístu klade odpor pouze vzduch či zpěněný olej. Poté, jakmile píst stlačí vzduchové bublinky, dochází k nárůstu síly a tlumič již vykazuje obvyklý tlumicí účinek. Odběr oleje 10 ml nebyl tak velký, aby se F-z diagram projevilo zavzdušnění. Stejně tak se v tomto stavu oproti odvzdušněnému tlumiči příliš nezměnil vyzařovaný hluk. Během zavzdušnění je možné problém přiřadit špatné funkci patního ventilu – zřejmě ventil vykazuje velký hydraulický odpor, což může vést ke vzniku bublin vlivem kavitace.

Frekvenční spektra všech stavů tlumiče STOS se výrazněji lišily především na pásmech 205–380 Hz a 440–860 Hz, kdy se zavzdušněný stav projevoval intenzivněji. To ovšem platí pouze pro vyšší frekvence excitace. Diagnostické kritérium porovnávající akustickou energii tlumiče zobrazovalo rostoucí hodnoty pro excitaci 2 a 3 Hz, a naopak klesající pro excitaci 1 Hz. Důvodem této změny může být rychlost pohybu pístu spojená s eliminací vzduchových bublin v oleji. Zatímco se tento děj u 1 Hz odehrává pozvolna, u vyšších excitačních frekvencí píst bubliny stlačí rychle a poměrně prudce narazí do oleje, což může vést k neplynulosti tlumení, která dále produkuje hluk. Hodnoty integračního kritéria dosahují mezi odvzdušněným a nejvíce zavzdušněným stavem rozdílu mezi 1 až 2,5 %, což není příliš. Toto kritérium tedy není pro tlumič STOS optimální a dále využitelné. Druhá možnost ve formě regresního kritéria dokázala úspěšně kvantifikovat rozdílné průběhy hluku v grafech synchronní filtrace. Nejvíce signifikantní výsledky se nacházejí při excitaci tlumiče 1 Hz v tahové části cyklu, kde sklon lineární regrese klesá společně s rostoucí mírou zavzdušnění, a to přes všechny frekvence excitace. Optimální diagnostické kritérium tlumiče STOS nebere v potaz prudký nárůst hluku na počátku kompresní fáze. Mnohem zřetelnější rozdíl hodnot je ve zmíněné fázi tahu, zde správně fungující tlumič plynule navyšuje své akustické projevy, zatímco u toho zavzdušněného hluk mírně klesá.

U experimentů s tlumičem Fiat se nejvýznamněji lišily projevy nikoliv mezi jednotlivými stavy zavzdušnění, ale celkově mezi oběma verzemi tlumiče. U originální verze se oproti té adaptivní výrazně projevovaly frekvence v pásmu 255 až 470 Hz. F-z charakteristiky jsou si u obou verzí velmi podobné, menší rozdíl je mezi tlumicí silou v tahu a také ve tvaru křivky na počátku komprese – originální verze vykazuje prudší náběh tlumicí síly. Z hlediska konstrukce jsou ale oba tlumiče velmi odlišné. Adaptivní verze je rozdělena na dvě části a opatřena relativně masivním návarkem se závitem pro opětovné spojení obou částí. Tato zásadní změna zřejmě ovlivňuje tuhost a vlastní frekvence pláště a zamezuje výraznějším projevům na výše zmíněném frekvenčním pásmu.

Při největším odběru oleje přibližně 45 ml bylo vyvolané zavzdušnění tak intenzivní, že naprosto poklesla tlumicí síla v tlačném směru. Přesto se akustické projevy příliš neliší od ostatních měřených stavů, což může být dáno menší konstrukcí tlumiče. Závada typu zavzdušnění proto nemá potenciál výrazně pozměnit vyzařované frekvenční spektrum.

Při porovnání jednotlivých grafů synchronní filtrace (pro různá pásma, excitace a odběry oleje) se velikosti hladin intenzity hluku povětšinou zdají nahodilé



a bez žádného náznaku pravidla. Zřejmě jsou velikosti hladin závislé na mnoha faktorech, ať už přesném ustavení zvukoměru a vzdálenosti měření od pláště, natočení tlumiče, dotažení víčka během odběru oleje, způsob uchycení a míra dotažení tlumiče na tester Inova atd.

Přesto se povedlo pomocí diagnostického kritéria identifikovat zavzdušnění. Kritérium porovnávající emitovanou akustickou energii tlumičů dokázalo pouze potvrdit závěry vypořizované již z FFT křivek – tlumič originální verze se projevuje na pásmu 255–470 Hz intenzivněji, zatímco různé stavy zavzdušnění u adaptivní verze jsou si svými projevy velmi podobné. Mírně se na tomto frekvenčním pásmu odlišoval stav se 127 ml oleje (plný objem), a to pouze na frekvencích 1 a 2 Hz. Na vyšších frekvencích excitace nejsou patrné již žádné rozdíly. Excitováním vyššími frekvencemi se zřejmě tlumič dostává mimo optimální pracovní rychlosti a zavzdušnění již nepozměňuje intenzitu akustických projevů. Druhé kritérium porovnává sklon lineární regrese hluku. Na frekvenčním pásmu 255–470 Hz vykazují hodnoty postupný pokles sklonu při rostoucí míře zavzdušnění. Na zdvihovém intervalu počátku komprese se nacházejí nejvýraznější rozdíly při excitaci 1 Hz. Právě tyto parametry nejvíce vypovídají o zavzdušnění a v případě tlumiče Fiat by mohly být využity jako diagnostické kritérium.

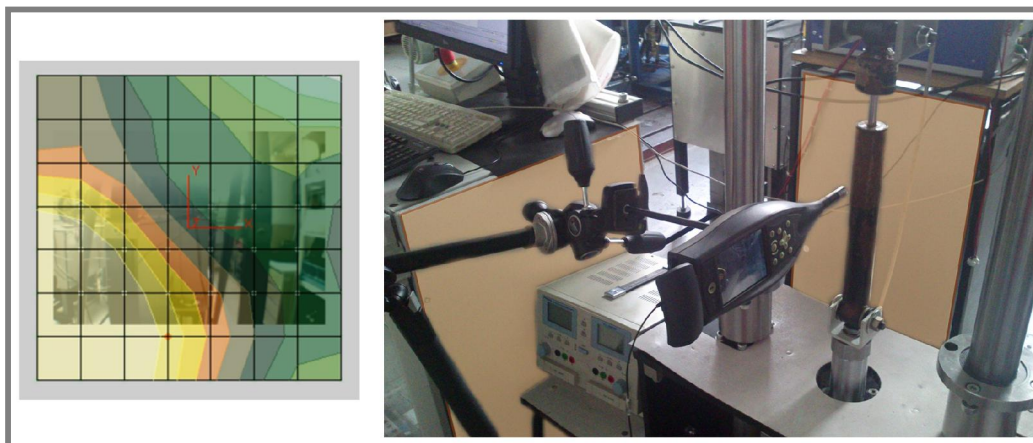
U průběhu hluku synchronních filtrací se může zdát, že frekvence excitací 1 a 2 Hz mají „zašuměná“ data oproti excitacím 3 a 4 Hz, kde jsou průběhy hluku „vyhlazené“. To je způsobeno tím, že měření s excitací 4 Hz má oproti excitaci 1 Hz pouze čtvrtinový počet vzorků na jeden cyklus, takže průběh křivek hluku se zdá plynulejší. Nižší frekvence excitace vykazuje díky většímu počtu vzorků naopak přesnější tvar křivky.

Mírným neúspěchem během všech experimentů skončila snaha přesně definovat celkové projevy od aktuátoru Inova. Experimenty sice bylo prokázáno, že nejsilnější projev aktuátoru se nachází na stálé frekvenci 225 Hz. Avšak do měření vstupovaly další hlukové projevy excitační stanice ve frekvenčních pásmech kolem této frekvence. Bylo vypořizováno, že se nežádoucí hluky do značné míry mění v závislosti na tuhosti celé soustavy aktuátor – tlumič. Naměřený hluk z excitace samotného pulsátoru tedy plně neodpovídá hluku při excitaci aktuátoru s tlumičem. Různé intenzity zavzdušnění tlumiče mění jeho tlumicí sílu, tím se mění i vyvíjená síla pro zdvih aktuátoru. Stejně tak jsou potřebné jiné síly pro zdvih různých typů tlumičů. Tím může dojít pro každý experiment k excitaci jiných vlastních frekvencí soustavy a k mírné změně hlukových projevů aktuátoru.

Během experimentů došlo také k výměně rámové konstrukce u aktuátoru, která zajišťuje přichycení horní, nepohyblivé části tlumiče přes siloměr. Byly provedeny kontrolní měření na starém a novém typu rámu za stejných podmínek. Naměřené akustické projevy měly totožný průběh.

Umístění aktuátoru Inova je přibližně 0,5 m pod testovaným tlumičem. Na velkém množství měření s lokalizací zdrojů hluku byly akustické projevy aktuátoru kolem frekvence 225 Hz lokalizovány opravdu na tomto místě – na akustické mapě se hluk zobrazuje u spodního okraje. V některých případech se ale hluk aktuátoru na frekvenčních pásmech kolem 225 Hz zobrazil mírně výš nad spodním okrajem, přibližně v jedné třetině mapy. V jiných případech zase v levém spodním rohu, jako je tomu na obr. 81 při měření hluku samotného aktuátoru. Důvodem těchto zkreslení může být zástavbový prostor kolem testovací stanice.

Jednak se na levé straně nachází řídicí jednotka pulsátoru (odrazy z levé strany), dále pak je za aktuátorem další elektronika společně s analyzátozem (odrazy zezadu zobrazují hluk aktuátoru výš).



**Obr. 81** Vlevo – Akustická mapa z lokalizace zdrojů hluku samotného aktuátoru Inova, excitace naprázdno 2 Hz. Vpravo – zástavbový prostor kolem testovací stanice, zvýrazněné odrazové plochy vlevo a vzadu.

## 6.2 Porovnání výsledků s poznatky z rešerše

6.2

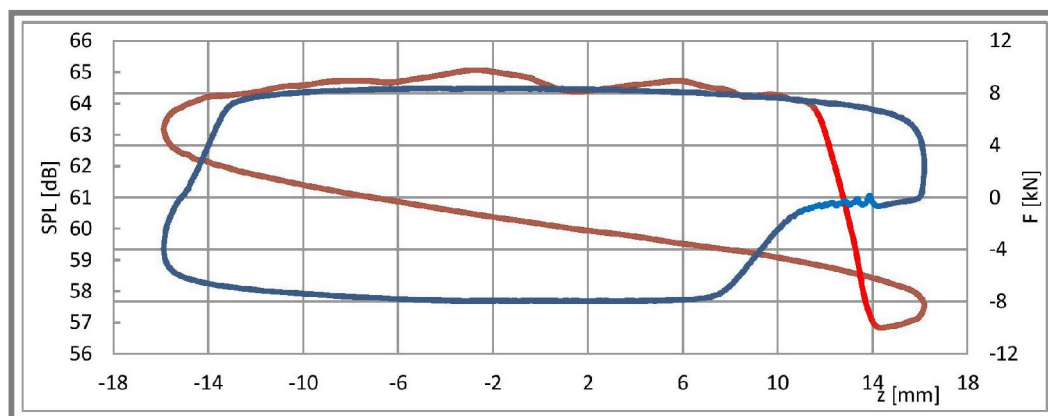
Z rešeršní části této práce (kapitola 2) vyplynulo několik poznatků ve spojitosti tlumičů a jejich akustických projevů. Tyto zjištění byly v experimentální části práce potvrzeny.

Většina analyzovaných studií [5–8, 10] se shoduje, že hluk tlumiče se projevuje především na frekvenčním pásmu do 1 kHz a s klesající frekvencí dochází ke zvýšené intenzitě projevů. Spodní frekvenční hranice se pohybuje kolem 100 a 200 Hz. V provedených experimentech byl naměřen hluk tlumičů opravdu do tohoto frekvenčního intervalu. V případě tlumiče STOS se výrazné projevy nachází do frekvence přibližně 860 Hz, u tlumiče Fiat pak do frekvence přibližně 470 Hz a u tlumiče Ford je horní frekvence projevů přibližně 900 Hz. Nízké frekvenční projevy byly obtížně identifikovatelné a z experimentů vyplynulo, že se jedná o zarušení akustického signálu, nikoliv o typický projev tlumičů. Výjimkou je pouze poškozená verze tlumiče Ford, kde se hluk tlumiče nacházel i v pásmu přibližně 1–2 kHz. Avšak vyvolaná poškození u tlumiče Ford není svým rozsahem běžné, proto také jeho projevy nespádají do frekvenční škály definované v odborných člácích.

Pro lokalizaci zdrojů hluku byla vybrána pokročilá metoda akustické holografie – SONAH. Protože se hluk projevoval na nižších frekvencích, lze zpětně zhodnotit, že volba metody pracující právě v nižším frekvenčním pásmu byla správná.

Dle [7, 9] by měly být hlukové projevy tlumiče lokalizovány především poblíž pístu. Provedené experimenty s metodou pro lokalizaci zdrojů hluku toto zjištění dokázaly potvrdit. V rešeršní části bylo dále zjištěno, že by se hlukové projevy tlumiče měly měnit vzhledem k aktuální fázi cyklu tlumení [5, 7, 11]. Spojitost mezi intenzitou vyzařovaného hluku a aktuální fází tlumicího cyklu byla potvrzena – jako příklad může být uvedeno pásmo 200–860 Hz tlumiče STOS, kde u zavzdušnění narůstaly projevy v každém cyklu pouze v určité fázi v tahu.

Jev zavzdušnění tlumiče bývá spojován s možnou kavitací v tlumicí kapalině. Dle [3, 15] se kavitace projevuje ve fázi komprese. Ve fázi stlačování vzniklých vzduchových bublin vznikají neplynulosti v tlumení, které dále vedou k tvorbě hluku. Při experimentech se zavzdušněným tlumičem STOS dochází na přelomu tahové a kompresní fáze k velkému hlukovému útlumu, píst totiž není v kontaktu s olejem, tudíž není vytvářen tlumicí účinek. Po počátku kompresní fáze jsou v F-z průběhu viditelné jasné neplynulosti tlumení a právě v tomto momentě skokově



**Obr. 82** Graf synchronní filtrace tlumiče STOS, frekvenční pásmo 205–360 Hz, excitace tlumiče 2 Hz. Barevně je zvýrazněn okamžik neplynulé odezvy tlumiče, v tomto momentě také výrazně narůstá intenzita hluku.

narůstá hluk tlumiče (viz obr. 82). Tímto je potvrzeno, že je zavzdušnění společně s kavitací zodpovědné za neplynulosti v tlumicí síle, které ve stejném okamžiku vedou k výraznému nárůstu hluku. Kavitaci a neplynulosti tlumení se však dle očekávání již v případě zavzdušněného tlumiče Fiat nepodařilo naměřit. Důvodem může být menší robustnost konstrukce tohoto tlumiče, intenzita kavitace nemá takový rozsah, aby změnila hlukové projevy tlumiče a vytvořila neplynulosti v tlumicí charakteristice.

Kavitace samotná je relativně tichý děj, očekávané zvukové projevy kolapsu vytvořených bublin se mohou nacházet na frekvencích v tisících Hz. V experimentech se zavzdušněním se takovéto vysoké frekvence však nijak výrazně neprojevovaly.

### 6.3 Metodika pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů

Z provedených experimentů v této diplomové práci vzešla obecná metodika pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů, která funguje na základě analýzy jejich akustických projevů. Celá metodika ve formě vývojového diagramu se nachází kvůli svému rozsahu v přílohách práce (viz příloha XVI).

Jelikož nemá závada svůj charakteristický, obecně definovatelný projev, který by byl přenositelný mezi jednotlivými tlumiči, je třeba přistupovat ke každému tlumiči individuálně. Hlukové projevy konkrétního testovaného tlumiče musí být nejprve naměřeny v jeho ideálním funkčním stavu. Takovýto hluk pak funguje jako etalon pro diagnostiku neznámého stavu daného tlumiče. Z naměřených hlukových projevů již testovaných tlumičů je vhodné vytvořit katalog poruch a jejich typických projevů. Při testování známé potenciální poruchy je pak možné okamžitě aplikovat předem dané vhodné diagnostické kritérium.

Celý diagram lze rozdělit na dvě větve, a to dle toho, jestli je známý druh potenciální vady. V případě, že vada není známá, je potřeba hluk tlumiče změřit mikrofonním polem, případně zvukoměrem a identifikovat rozdílné hlukové projevy vzhledem k etalonu. Po rozebrání tlumiče může být daná vada identifikována a zapsána se svým charakteristickým hlukovým projevem do katalogu poruch. Pokud však je potenciální vada známá, lze na naměřené hlukové projevy ihned aplikovat z katalogu poruch vhodná diagnostická kritéria. U tlumiče je pak možné identifikovat, případně i kvantifikovat rozsah dané vady.

---

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce potvrzuje hypotézu, že tlumič s vadou mění své akustické projevy, avšak charakter projevu vady se liší pro různé typy konstrukce tlumičů. Porovnání hluku správně fungujícího a poškozeného tlumiče může vést k vhodné volbě diagnostického kritéria a k detekci vadného stavu tlumiče. Je definována metodika pro diagnostiku tlumiče, čímž je splněn hlavní cíl práce.

První část rešerše diplomové práce je věnována přehledu hlukových projevů tlumiče. Jsou popsány příčiny neplynulého tlumení a s tím spojená tvorba hluku. Druhá část se zaměřuje na popis metod lokalizace zdrojů hluku, které jsou dostupné na ÚK. Je vysvětlen jejich princip činnosti, dále také výhody a omezení těchto metod. Na základě vytvořeného přehledu je vybrána vhodná lokalizační metoda, která je následně použita v experimentech.

Akustické projevy tlumičů byly měřeny mikrofonním polem a zvukoměrem. Pro lokalizaci zdrojů hluku byla využita metoda na bázi akustické holografie – SONAH. Zatímco destruktivní poškození tlumiče s plně vypuštěným olejem vykazovalo na akustické mapě jasné hlukové ohnisko, a to pouze v konkrétních fázích zdvihu, běžné poškození ve formě zavzdušnění se již nepodařilo touto metodou diagnostikovat. Avšak hlubší analýza akustického signálu již s využitím synchronní filtrace dokázala zobrazit rozdíly mezi odvzdušněným a zavzdušněným tlumičem. V případě vlakového tlumiče docházelo u zavzdušnění na frekvenčním pásmu 205–380 Hz k propadu a poté k prudkému nárůstu hluku na počátku kompresní fáze. Diagnostické kritérium identifikuje zavzdušnění porovnáním sklonů lineárních regresí křivky hluku na vybrané části zdvihu. Automobilový typ tlumiče pro změnu vykazoval v případě zavzdušnění klesající hodnoty celkových akustických energií na frekvenčním pásmu 255–470 Hz. Diagnostické kritérium v tomto případě definuje zavzdušnění srovnáváním obsahů ploch pod křivkou hluku, dále je opět úspěšně aplikováno i regresní kritérium.

Na závěr byla definována metodika pro diagnostiku tlumičů. V několika bodech je popsán obecný postup, jakým způsobem z naměřených hlukových projevů identifikovat stav tlumiče. Výhodou takovéto nové akustické metody je její relativní rychlost, jednoduchost a bezkontaktní způsob měření. Nevýhodou metody je nutnost naměřit hluk správně fungujícího tlumiče a tlumiče s vadou, tato data dále slouží k definici diagnostického kritéria pro daný tlumič. Formulovaná metodika může být využita k diagnostice např. při procesu vývoje nových tlumičů.

Jedním z omezení této práce je měření akustického záření tlumičů společně s hlukem aktuátoru, a to navíc mimo bezodrazovou komoru. Bez odstínění projevů aktuátoru a jiných negativních projevů hlukového pozadí jsou měření do jisté míry zkreslená, což platí především pro experimenty s lokalizací zdrojů hluku, která je citlivá na odrazy zvuku od okolního prostředí.

Měření s jinými typy metod pro lokalizaci zdrojů hluku může plně prošetřit diagnostický potenciál a možné benefity těchto metod. Vytvoření zjednodušeného softwarového modelu tlumiče se simulací šíření hluku prostorem by mohlo vést k lepšímu pochopení jeho akustických projevů. Navazující práce by se mohla soustředit také na projevy jiných typických závad tlumičů a provést experimenty na tlumičích s různým typem konstrukce.



## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Do I need Shocks? *Simple Car Answers* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: [http://www.simple-car-answers.com/images/Shock\\_cut\\_away.png](http://www.simple-car-answers.com/images/Shock_cut_away.png)
- [2] Akustika - měření akustického výkonu a lokalizace zdrojů hluku. *Vibration, Acoustics laboratory* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://vibroakustika.uk.fme.vutbr.cz/akustika.html>
- [3] DIXON, John C. *The Shock Absorber Handbook*. 2. vyd. Chichester, England: John Wiley, 2007. ISBN 9780470510209.
- [4] Tlumiče pérování. *Autoservis KVK* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <https://www.autoserviskvk.cz/inpage/akce-testovani-tlumicu/>
- [5] LAUWERYS, Xavier A., Fulop AUGUSZTINOVICZ, Maarten P. MAES a Gabor NAGY. Identification and Reduction of Sound Sources in Wheel Suspensions. In: *SAE Technical Paper*. 2000, s. 13. ISBN: 9073802679
- [6] YUNG, Victor Y. B. a David J. COLE. Modelling high frequency force behaviour of hydraulic automotive dampers. *Vehicle System Dynamics*. 2006, roč. 44, č. 1, s. 1–31. ISSN 0042-3114.
- [7] BENAZIZ, Marouane, Samuel NACIVET a Fabrice THOUVEREZ. A shock absorber model for structure-borne noise analyses. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, roč. 349, s. 177–194. ISSN 10958568.
- [8] YUNG, Victor Y. B. a David J. COLE. Wavelet analysis of high-frequency damper behaviour. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2005, sv. 219, č. 8, s. 977–988. ISSN 0954-4070.
- [9] BENAZIZ, Marouane, Samuel NACIVET, Jérémie DEAK a Fabrice THOUVEREZ. Double Tube Shock Absorber Model for Noise and Vibration Analysis. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*. 2013, sv. 6, č. 2013-01–1912, s. 1177–1185. ISSN 1946-4002.
- [10] HUANG, Hai B., Ren X. LI, Xiao R. HUANG, Ming L. YANG a Wei P. DING. Sound quality evaluation of vehicle suspension shock absorber rattling noise based on the Wigner-Ville distribution. *Applied Acoustics*. 2015, sv. 100, s. 18–25. ISSN 1872910X.
- [11] SACRAMENTO, German a Jorge BIERA. Simulation tool for shock absorber noise prediction in time and frequency domains. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. 2007, sv. 3, č. 3, s. 217. ISSN 1479-1471.
- [12] Aplikace nerovnovážné termodynamiky v hydrodynamice. *Katedra obecné fyziky* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <https://www.nelterm.kof.zcu.cz/hydrodynamika/styktekutin/styktekutin.html>
- [13] ALONSO, M. a Á. COMAS. Thermal model of a twin-tube cavitating shock absorber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2008, sv. 222, č. 11, s. 1955–1964. ISSN 0954-4070.
- [14] DHS-stack. *PhotoBucket* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://s867.photobucket.com/user/djmpics/media/TT/Ohlins-TTX/DHS-stack/24-roehrig-cavitation.png.html>
- [15] LUO, Feng a Xiao Li ZHANG. A Review of Aeration and Cavitation Phenomena in the Hydraulic Shock Absorber. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, sv. 536–537, s. 1369–1373. ISSN 1662-7482.

- [16] PAGE, George. Predict Control Valve Noise: A graphical method for liquid-flow systems eases the task. *Chemical Engineering*. 2000, sv. 107, č. 9, s. 23–26. ISSN 00092460.
- [17] ALONSO, M. a Á. COMAS. Modelling a twin tube cavitating shock absorber. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*. 2006, sv. 220, č. D8, s. 1031–1040. ISSN 0954-4070.
- [18] Acoustic holography. *Electrical Engineering and Science for Manufacturing Applications* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: [http://www.industrial-electronics.com/measurement-testing-com/Acoustic\\_holography.html](http://www.industrial-electronics.com/measurement-testing-com/Acoustic_holography.html)
- [19] ROSSING, Thomas D. *Springer handbook of acoustics*. New York: N.Y.: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-30446-5.
- [20] Introduction, Implementation, Theory. *Acoustic holography* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://www.acoustic-holography.com/acoustic-holography.htm>
- [21] MAYNARD, J. D., E. G. WILLIAMS a Y. LEE. Nearfield Acoustic Holography: I - Theory of Generalized Holography and the Development of NAH. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1985, sv. 78, č. 4, s. 1395–1413. ISSN 00014966.
- [22] JUHL, Peter a Jesper GOMES. A comparison of SONAH and IBEM for near-field acoustic holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2008, sv. 123, č. 5, s. 3386. ISSN 00014966.
- [23] Noise source identification. *Brüel and Kjaer* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/en/Applications/product-noise/Noise-source-identification>
- [24] HALD, Jørgen. Extension of acoustic holography to cover higher frequencies. *Brüel & Kjær SVM A/S*. nedatováno, s. 1–15.
- [25] OLSEN, Erling Sandermann a J. HALD. Technical review No. 1 - 2005. *Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S*. 2005, roč. 15, č. 4, s. 1–57.
- [26] J. HALD. Technical Review No. 1 - 2000. *Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S* [online]. 2007, s. 1–15. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://www.bksv.es/doc/bn1621.pdf>
- [27] GOMES, Jesper, Yutaka ISHII a Bernard GINN. Non-stationary Holography on Arbitrary Source Shapes. In: *INTER.NOISE*. Melbourne: Brüel & Kjaer, 2014, s. 1–10. ISBN 9780909882037.
- [28] iMoire. *Vincent Scheib* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://www.scheib.net/school/238/imoire/>
- [29] DEBLAUWE, FILIP, Karle Jansen a Maxime Robin. Extending the Usability of Near-Field Acoustic Holography and Beamforming by Using Focalization. In: *14th International Congress on Sound Vibration*. Cairns: Australian Acoustical Society, 2013, s. 1–8. ISBN: 9781627480000
- [30] Array-based Acoustic Holography and Focalization. *Siemens Automation* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: [http://www.plm.automation.siemens.com/en\\_us/products/lms/testing/test-lab/acoustic/array-based-holography-focalization.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/testing/test-lab/acoustic/array-based-holography-focalization.shtml)
- [31] CHRISTENSEN, J.J. a J. HALD. Technical review No. 1 - 2004. *Brüel&Kjær Sound & Vibration Measurement A/S* [online]. [cit. 5. července 2017]. 2004,

- roč. 15, č. 4, s. 1–54. Dostupné z: <https://www.bksv.com/media/doc/bv0056.pdf>
- [32] GRANDE, E Fernandez a Finn JACOBSEN. Supersonic acoustic intensity with statistically optimized near-field acoustic holography. In: *INTER.NOISE*. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2011, s. 1–7. ISBN 9781618392800.
- [33] IOANNIDES, Panayiotis, Student MEMBER, Constantine A BALANIS a Life FELLOW. Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2005, sv. 4, č. 1, s. 351–354. ISSN: 15361225
- [34] Směrová charakteristika mikrofону. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/383-smerova-charakteristika-mikrofону>
- [35] Sidelobes. *Wikipedia Commons* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sidelobes\\_en.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sidelobes_en.png)
- [36] Typical Antenna Pattern. *Wikipedia Commons* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typical\\_Antenna\\_Pattern.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typical_Antenna_Pattern.jpg)
- [37] Paddle 2x24 AC Pro. *Acoustic Camera* [online]. [cit. 5. července 2017]. Dostupné z: <http://www.acoustic-camera.com/en/products/microphone-arrays/paddle-2x24-ac-pro.html>
- [38] Product Data: PULSE Array-based Noise Source Identification Solutions: Beamforming Type 8608, Acoustic Holography Type 8607 and Spherical Beamforming Type 8606. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2144.ashx>
- [39] Product Data: Hand-held Analyzer Types 2250 and 2270. *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2025.ashx>
- [40] Bruel & Kjaer 2270 Sound Level Meter and Vibration Analyzer. *Advanced Test Equipment Rentals* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.atecorp.com/products/bruel-kjaer/2270>
- [41] Tlumiče. *Strojírna Oslavany* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://www.st-os.cz/cz/tlumice/>
- [42] FIAT 500 Rear Strut Shock Absorber. *Fiat Alfa Dealer Parts* [online]. [cit. 9. prosince 2017]. Dostupné z: <http://www.fiatalfadealerparts.co.uk/fiat-500-rear-strut-shock-absorber.html>
- [43] DEWE-800. *DEWETRON Ges.m.b.H* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <https://www.dewetron.com/products/chassis/mainframes/dewe-800/>
- [44] TŌYAMA, Mikio a Tsunehiko KOIKE. *Fundamentals of acoustic signal processing*. Digital print. San Diego: Academic, 1998. ISBN 9780126926606.
- [45] Filtrace signálu. *Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 9. listopadu 2017]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/daq/Ka05-04.htm>
- [46] HIXSAN, Elmer L. a Michael MÖSER. *Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control*. 2. vyd. New York: Springer, 2004. ISBN 0387405569.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

---

AH	- Acoustic Holography
NAH	- Near-Field Acoustic Holography
SONAH	- Statistically Optimized NAH
FFT	- Fast Fourier transform
FIR	- finite impulse response
ÚK	- Ústav konstruování
$f_{max}$ [Hz]	- maximální měřitelná frekvence
$c_o$ [m·s]	- rychlost zvuku
$\Delta$ [m]	- vzdálenost mikrofonů
$R_{BF}$ [m]	- rozlišení měření
$L$ [m]	- vzdálenost měření od zdroje
$D$ [m]	- průměr měřicího pole
$\lambda$ [m]	- vlnová délka měřeného zvukového signálu

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

10

<b>Obr. 1</b> Řez jednoplášťovým tlumičem [1].	13
<b>Obr. 2</b> Ruční a stacionární mikrofonní pole dostupné na ÚK, FSI VUT v Brně [2].	14
<b>Obr. 3</b> Frekvenční spektrum mezi 200 až 800 Hz síly působící na pístnici. Velké množství hodnot spadá především do frekvencí pod 400 Hz [7].	16
<b>Obr. 4</b> Levá část představuje zvukové spektrum normálně pracujícího tlumiče, pravá část pak tlumič projevující se rachotivým zvukem [10].	17
<b>Obr. 5</b> Vtoková nestabilita, v tomto případě se jedná o projev nestability proudění vykreslený na písčitém dně [12].	17
<b>Obr. 6a</b> Časový průběh zrychlení a jeho frekvenční rozklad [5].	18
<b>Obr. 6b</b> Časový průběh akustického tlaku v interiéru vozidla a jeho frekvenční rozklad [5].	18
<b>Obr. 7a</b> Časově frekvenční doména (nahore) zrychlení změřeného na pístnici tlumiče. Dole je zobrazen časový průběh tohoto zrychlení [7].	19
<b>Obr. 7b</b> Časově frekvenční doména (nahore) tlumičí síly tlumiče. Dole je zobrazen časový průběh této síly [7].	19
<b>Obr. 8</b> Tlumičí křivka pro excitaci tlumiče frekvencí 1 Hz, amplitudou 40 mm [8].	19
<b>Obr. 9</b> Schémata teleskopických tlumičů a znázornění škrticích elementů, tedy míst, kde může vznikat kavitace [3].	20
<b>Obr. 10</b> Tlumič s kavitací (vlevo) a bez kavitace (vpravo) [14].	21
<b>Obr. 11</b> Závislost teploty tlumičí kapaliny a pracovního času tlumiče. Tlumič je buzen frekvencí 1,5 Hz s amplitudou 40 mm, sinusový signál [13].	21
<b>Obr. 12</b> Průběh F-v charakteristiky tlumiče (nahore). Výřez A z této křivky je zobrazen ve spodní části obrázku. Horní křivka je pro tlumič s kavitací, spodní pro ten bez kavitace [17].	22
<b>Obr. 13</b> F-v a F-x charakteristika při zavzdušnění a následném stlačování vzduchových bublinek [15].	23
<b>Obr. 14</b> Příklad měření zvuku za pomoci akustické holografie, která poskytuje přesnou zvukovou mapu o vysokém rozlišení představující rovinu povrchu zvukového zdroje [18].	23
<b>Obr. 15</b> Ilustrace metody akustické holografie. Měřicí pole je umístěno v blízkém poli zdroje a dokáže zachytit i evanescentní vlny [19].	24
<b>Obr. 16</b> Závislost horní limitní frekvence a rozestupu mikrofonů [19].	25
<b>Obr. 17</b> Závislost rozteče měřicích bodů na maximální měřitelné frekvenci [26].	25
<b>Obr. 18</b> Moaré vzor, příklad aliasingu [28].	26
<b>Obr. 19</b> Ukázka edge efektu vzniklého při měření metodou NAH. Zvuková mapa kopíruje okraje vypočteného obrazce, jelikož je zvukový zdroj větší než mikrofonní pole [25].	27
<b>Obr. 20</b> Průběh procesů během metody NAH [19].	28
<b>Obr. 21</b> Na levé části je patrný edge efekt metody NAH. Při použití metody SONAH tento nepříznivý jev zmizí (vpravo) [26].	28
<b>Obr. 22</b> Míra chybovosti v závislosti na frekvenci. Plná čára představuje NAH, čárkovaná pak SONAH [32].	29
<b>Obr. 23</b> Měření zvukového zdroje metodou beamforming [23].	30
<b>Obr. 24</b> Princip metody beamforming na příkladu jednoho zvukového zdroje a roviny mikrofonního pole [31].	30
<b>Obr. 25</b> Směrová charakteristika beamformingu [31].	31



<b>Obr. 26</b> Typy směrových charakteristik beamformingu [34].	31
<b>Obr. 27</b> Hlavní a postranní laloky směrové charakteristiky beamformingu [35].	32
<b>Obr. 28</b> Rovinný řez směrové charakteristiky beamformingu [36].	32
<b>Obr. 29</b> Dosažitelné rozlišení NAH a beamformingu v závislosti na velikosti měřené frekvence. NAH má relativně konstantní rozlišení, které je ale limitované rozsahem frekvence. Beamforming není nijak limitovaný, ale při nízkých frekvencích je rozlišení příliš malé [29].	33
<b>Obr. 30</b> Veličiny ze vztahu pro $R_{bf}$ . Vzdálenost $R$ představuje dosažitelné rozlišení [31].	34
<b>Obr. 31</b> Různé stupně prostorového rozlišení. Zvukové zdroje na levé straně splývají, vpravo jsou od sebe již odlišitelné [29].	34
<b>Obr. 32</b> Uniformní rozprostření mikrofónů použité na anténách značky Brüel & Kjær [24, 37].	35
<b>Obr. 33</b> Akustické mapy metody beamforming, porovnání frekvence a vzdálenosti měření [25].	36
<b>Obr. 34</b> Využívané kruhové mikrofónní pole pro experimenty, výrobce Brüel & Kjær [2].	40
<b>Obr. 35</b> Využívaný zvukoměr typu 2270, výrobce Brüel & Kjær [40].	40
<b>Obr. 36</b> Automobilový tlumič z vozidla Ford Focus.	41
<b>Obr. 37</b> Využívaný tlumič pro experimenty, výrobce STOS.	41
<b>Obr. 38</b> Výkresový pohled řezu tlumiče STOS.	42
<b>Obr. 39</b> Automobilový tlumič z vozu Fiat 500 [42].	42
<b>Obr. 40</b> Adaptivní verze tlumiče Fiat. V levé části obrázku je tlumič rozebrán. Vpravo je patrná již úprava se závitovým spojením obou částí pláště tlumiče a také zpětný ventil.	43
<b>Obr. 41</b> Aktuátor Inova a část původní rámové konstrukce.	43
<b>Obr. 42</b> Využívaný analyzátor od výrobce DEWETRON [43].	44
<b>Obr. 43</b> Měřicí řetězec prvního způsobu měření, s mikrofónním polem.	45
<b>Obr. 44</b> Měřicí řetězec druhého způsobu měření, se zvukoměrem.	45
<b>Obr. 45</b> Odšroubované horní víčko tlumiče STOS pro odběr oleje z důvodu zavzdušnění tlumiče.	47
<b>Obr. 46</b> Porovnání časové a frekvenční oblasti akustického signálu v programu DEWESoft.	48
<b>Obr. 47</b> Příklady dolní propusti, horní propusti, pásmové propusti a pásmové zádrže. Jedná se o ideální stav, reálně není strmost přechodové charakteristiky nekonečná [45].	49
<b>Obr. 48</b> Příklad synchronní filtrace, hladina akustického tlaku [dB] v závislosti na zdvihu pístnice [mm] je znázorněna červeně. Graf je doplněn o F-z charakteristiku tlumiče (modře).	49
<b>Obr. 49</b> Průběh experimentu pro lokalizaci zdrojů hluku s využitím kruhového mikrofónního pole. Dolní úvrat' cyklu tlumiče Ford je zaznamenávána laserovým senzorem.	50
<b>Obr. 50</b> Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih společně s celkovou FFT hluku. Tlumič v původním stavu (vlevo) se projevuje méně intenzivně než poškozený tlumič (vpravo). Excitace tlumiče 2 Hz.	51
<b>Obr. 51</b> Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih, pásmo 950 až 1 600 Hz. Vlevo původní stav tlumiče, vpravo poškozený tlumič. Excitace tlumiče 3 Hz.	51

- Obr. 52** Akustické mapy hlukového projevu „klepnutí“ poškozeného tlumiče Ford, pásmo 950 až 1 600 Hz. Vlevo první „klepnutí“, vpravo pak druhé. Ciferníky představují danou fázi zdvihu tlumiče z jeho celého cyklu, a to ve formě 0 až 360 stupňů. Excitace tlumiče 4 Hz. 52
- Obr. 53** Celková FFT vyzařovaného hluku tlumiče Ford za celý interval zdvihu, frekvenční pásmo 0–1,8 kHz. Vlevo původní stav tlumiče, vpravo poškozený tlumič. Excitace tlumiče 2 Hz. 52
- Obr. 54** Průběh experimentů se zvukoměrem, nejprve je naměřen hluk původního stavu tlumiče Ford, poté hluk tlumiče s vypuštěným olejem a poškozeným pláštěm. 53
- Obr. 55** Frekvenční spektrum akustického signálu tlumiče Ford. Oranžová – původní stav tlumiče, růžová – poškozený tlumič. Excitace tlumiče 1 Hz. 54
- Obr. 56** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič Ford. Vlevo původní stav, vpravo tlumič s poškozením. Excitace tlumiče 4 Hz. 55
- Obr. 57** Rozdělení frekvenčních spekter akustického signálu tlumiče Ford na jednotlivá pásma. Rozsahy pásem jsou vypsány v tab. 1. Oranžová – původní stav tlumiče, růžová – poškozený tlumič. Excitace tlumiče 4 Hz. 55
- Obr. 58** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) obou stavů tlumiče Ford. Excitace 3 Hz, dolní propust 1 000 Hz. 56
- Obr. 59** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) obou stavů tlumiče Ford. Excitace 3 Hz, pásmová propust 1 150–2 000 Hz. 56
- Obr. 60** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), a to pro jednotlivá pásma. Výpočty obsahů probíhají v celém intervalu zdvihu. 57
- Obr. 61** Průběh měření s využitím akustické holografie a metody SONAH. Mikrofonní pole a tlumič STOS jsou zachyceny před samotným experimentem. Zaznamenání dolní úvratě tlumiče bylo provedeno bezkontaktně laserovým senzorem. 58
- Obr. 62** Vlevo: frekvenční spektrum od vzdušného stavu. Vpravo: frekvenční spektrum tlumiče se zavzdušněním. Tlumič STOS, excitace tlumiče 2 Hz. 59
- Obr. 63** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče STOS. Vlevo od vzdušného, vpravo zavzdušněný stav. Frekvenční pásmo 280–1 000 Hz, excitace tlumiče 3 Hz. Ciferník představuje danou fázi zdvihu tlumiče z celého cyklu tlumení. 59
- Obr. 64** Akustická mapa při experimentu s tlumičem STOS. Frekvenční oktavové pásmo poblíž frekvence 200 Hz. Excitace tlumiče 1 Hz. 60
- Obr. 65** Graf zastoupení frekvencí v čase akustických projevů tlumiče a pulsátoru, samotného aktuátoru Inova a odečtu těchto dat. 61
- Obr. 66** Průběh experimentů s tlumičem STOS a zvukoměrem (vlevo). Odšroubování horního víčka tlumiče a odběr přesného objemu oleje (vpravo). 62
- Obr. 67** FFT z celého akustického signálu tlumiče STOS s definicí jednotlivých pásem. Růžová křivka – odběr 0 ml oleje, oranžová – odběr 25 ml, modrá – odběr 50 ml, zelená odběr 60 ml. Rozsahy pásem jsou vypsány v tab. 2. Excitace tlumiče 2 Hz. 62
- Obr. 68** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič STOS. Zleva doprava: odběr 0 ml, 25 ml, 50 ml a 60 ml. Excitace tlumiče 2 Hz. 63

- Obr. 69** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) pro různou velikost odebraného objemu oleje v tlumiči STOS. Excitace 2 Hz, pásmo 205–380 Hz. 64
- Obr. 70** FFT blokové historie akustického signálu tlumiče STOS pro jednotlivé velikosti odběru oleje. Růžová křivka – odběr 0 ml oleje, oranžová – odběr 25 ml, modrá – odběr 50 ml, zelená odběr 60 ml. Excitace 2 Hz, počátek fáze tahu. Jasně patrný vyšší hluk u více zavzdušněného tlumiče. 65
- Obr. 71** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), a to pro jednotlivá pásma. Výpočty obsahů probíhají ze zdvihu od -12 mm do 0 mm, tedy z části fáze tahu. 66
- Obr. 72** Ilustrace funkce diagnostických kritérií – vlevo integrační kritérium porovnávající obsahy ploch pod křivkou, vpravo kritérium lineární regrese porovnávající sklon přímky vůči ose x. 66
- Obr. 73** Tabulky představují hodnoty sklonu lineárních regresí z hluku, a to pro jednotlivá pásma. Výpočet regrese probíhá od zdvihu -12 mm do 12 mm, tedy téměř z celé fáze tahu. Hodnoty sklonu jsou ve stupních vzhledem k ose x. 67
- Obr. 74** Průběh experimentů se zvukoměrem a tlumičem Fiat. Vlevo adaptivní verze tlumiče, vpravo pak originální verze. 67
- Obr. 75** Frekvenční spektrum hluku obou verzí tlumiče Fiat. Růžová – adaptivní, 80 ml oleje; oranžová – adaptivní, 100 ml; modrá – adaptivní, 127 ml a zelená – originál. Excitace 4 Hz. 68
- Obr. 76** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič Fiat. Zleva doprava: originální verze, 80 ml oleje, 100 ml a 127 ml. Excitace tlumiče 3 Hz. 69
- Obr. 77** F-z charakteristiky (modře) a synchronní filtrace hladin akustické intenzity v závislosti na zdvihu (červeně) pro různé stavy obou typů tlumiče Fiat. Excitace 3 Hz, frekvenční pásmo 255–470 Hz. 70
- Obr. 78** Tabulky představují hodnoty sklonu lineárních regresí z hluku, a to pro frekvenční pásmo 255–470 Hz. Výpočet regrese probíhá od zdvihu 20 mm do 0 mm (vlevo) a od zdvihu 20 mm do -20 mm (vpravo). Hodnoty sklonu jsou ve stupních vzhledem k ose x. 71
- Obr. 79** Tabulky představují hodnoty emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou) tlumiče Fiat, a to pro frekvenční pásmo 255 až 470 Hz. Výpočet obsahů probíhá v celém intervalu zdvihu (vlevo) a v intervalu -15 až 15 mm, tedy v téměř celé fázi tahu (vpravo). 71
- Obr. 80** Rozdílná strmost náběhu hluku v grafech synchronní filtrace tlumiče Ford s poškozením, frekvenční pásmo 1 150 až 2 000 Hz, excitace 1 Hz (nahore) a 4 Hz (dole). 74
- Obr. 81** Vlevo – Akustická mapa z lokalizace zdrojů hluku samotného aktuátoru Inova, excitace naprázdno 2 Hz. Vpravo – zástavbový prostor kolem testovací stanice, zvýrazněné odrazové plochy vlevo a vzadu. 77
- Obr. 82** Graf synchronní filtrace tlumiče STOS, frekvenční pásmo 205–360 Hz, excitace tlumiče 2 Hz. Barevně je zvýrazněn okamžik neplynulé odezvy tlumiče, v tomto momentě také výrazně narůstá intenzita hluku. 78

**11 SEZNAM TABULEK****11**

---

**Tab. 1** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič Ford. 54

**Tab. 2** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič STOS. 64

**Tab. 3** Rozčlenění frekvenčního spektra na jednotlivá pásma a jejich možné charakteristiky, tlumič Fiat. 69

---

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

- I** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih, celé frekvenční spektrum
- II** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford za celý zdvih, frekvenční spektrum 950–1 600 Hz
- III** Akustické mapy hlukových projevů tlumiče Ford v okamžiku prvního „klepnutí“ a druhého „klepnutí“, frekvenční spektrum 950–1 600 Hz
- IV** Grafy synchronní filtrace hluku tlumiče Ford, vybraná frekvenční pásma
- V** Frekvenční spektra hluku tlumiče STOS
- VI** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič STOS
- VII** Grafy synchronní filtrace hluku tlumiče STOS, vybraná frekvenční pásma
- VIII** Tabulky hodnot emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), tlumič STOS
- IX** Tabulky hodnot sklonů lineárních regresí hluku, tlumič STOS
- X** Frekvenční spektra hluku tlumiče Fiat
- XI** Grafy zastoupení frekvencí hluku v čase, tlumič Fiat
- XII** Grafy synchronní filtrace hluku tlumiče Fiat, vybraná frekvenční pásma
- XIII** Tabulky hodnot sklonů lineárních regresí hluku, tlumič Fiat
- XIV** Tabulky hodnot emitovaných akustických energií (obsahy ploch pod křivkou), tlumič Fiat
- XV** DVD – data z experimentů
- XVI** Diagram metodiky pro bezkontaktní diagnostiku automobilových tlumičů
- XVII** Laboratorní protokol – měření s mikrofonním polem
- XVIII** Laboratorní protokol – měření se zvukoměrem
- IX** Odborný článek